

边载作用下桩基承载性能数值分析

姚文娟¹, 陈尚平¹, 陈杰¹, 程泽坤²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 中交第三航务工程勘察设计院, 上海 200072)

摘要: 桩基除了承受自身上部建筑物的荷载外, 经常还承受各种形式的边载作用。边荷载会引起桩周土体的沉降, 产生额外附加力, 即负摩阻力。这些可导致桩基的承载力下降使结构破坏。通过建立桩土共同作用的三维数值模型, 分析边载作用下桩基承载性能。主要研究了边载大小和边载距离对桩侧摩阻力的影响规律; 桩长和边载距离组合对其的影响规律; 得出了2个组合关系的表达式。同时应用最小二乘法得到不同边载组合的桩侧总摩阻力表达式, 并依据离散系数的统计分析, 验证了该函数表达式具有较高的精确度。得到结论: 当边载距离 s 和边载大小 Q 的相对关系 k 值增加至 32 时, 由边载产生的桩侧负摩阻力趋于 0; 当桩长 L 和边载距离 s 的相对关系 c 值增加至 0.5 时桩侧负摩阻力趋于 0。即在这 2 个相对关系极限值以外, 桩基承载性能将不受边载影响。

关键词: 桩基; 边载; 侧摩阻力; 曲线拟合

中图分类号: TU437 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2012)04-0006-06

Numerical Analysis on Bearing Capacity of Piles Subjected to Side Loads

YAO Wenjuan¹, CHEN Shangping¹, CHEN Jie¹, CHENG Zekun²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd, Shanghai 200072, P. R. China)

Abstract: Besides the loading applied by the upper building, the piles are often subjected to indirect loading such as side loads. These kinds of loads would cause the pile bear additional force (negative skin friction), which may be large enough to reduce the bearing capacity and cause structural failure of a pile. By establishing the numerical model of pile-soil interaction, the bearing capability of pile under side load was analyzed. The joint effect of different magnitude and the distance of the side load on the skin friction were focused. The joint effect of length of the pile and the distance of side load on the skin friction was discussed. The expression of the two combination relationship was obtained. Meanwhile, by using the least square method, the expression of total skin friction on different side load combination was achieved. And based on the statistical analysis of the dispersion coefficient, the function expression was proved to be of high precision. The results show that when k , which indicates the relative relation of side load distance s and the side load magnitude Q , increases to 32, the value of negative skin friction goes to zero. When c , indicating the relative relation between pile length L and side load distance s , increases to 0.5, the value of negative skin friction goes to zero. Beyond limit value of these two relative relationships, the bearing capability of the pile will not be affected by side loads.

Key words: pile foundation; side loads; skin friction; curve fitting

收稿日期: 2012-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072143)

作者简介: 姚文娟(1957-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程、结构与土的相互作用研究, (E-mail) wenjuan@mail.shu.edu.cn.

随着国民经济的发展,建筑密集度越来越高,由于空间的局限,不论是在施工过程中抑或在完工后,常常会有大量边载对已有的建筑产生影响。比如周边建筑物、路堤、抛石、周边基坑开挖,周边大量材料堆积等引起的边荷载对桩基的承载性能有很大的影响^[1-3]。边荷载会引起所在区域土体的固结沉降和侧向变形^[4],特别当处于软弱土层时,边荷载会引起桩周土体的沉降,产生额外的附加力,即负摩阻力^[5-6]。近年来在沿海城市软土地区,由于设计时未考虑边荷载的影响而出现较大的差异沉降导致建筑物倾斜、开裂而无法使用。2009年6月27日上海市莲花河畔景苑13层在建住宅楼就是大量的堆土边荷载导致整栋高楼及桩基连根拔出倒塌破坏。因此边载效应削弱桩基承载力,引起建筑物的损坏这类问题正日益引起人们的关注,更是目前工程迫切需要解决的问题。

负摩阻力引起桩基承载力下降问题一直是研究热点之一,Matyas等^[7]论述了桩身上负摩阻力和中性面的存在,特别是中性面的位置取决于桩周土体的固结程度。赵明华等^[8]将能量法方程引入负摩阻力的数值计算,并将其与桩身位移协调方程联立,得到桩侧负摩阻力的迭代解。Lee等^[9]对承受堆载作用的群桩承载性能进行了研究。律文田等^[10]通过路基填土过程中桥台桩基的现场试验,得到基桩内力和负摩阻力的变化规律。魏鉴栋等^[11]针对在大面积堆载情况下桩身因周边土体沉降出现负摩阻力问题,提出了从工程现场试验桩获得堆载作用下桩的荷载-位移曲线的方法。目前堆载作用下的负摩阻力研究大部分是基于现场实测或简化模型,同时关于桩基承受边荷载作用的研究鲜为报道。鉴于此,笔者基于能很好模拟桩-土相互作用的ABAQUS软件,建立了单桩在边荷载作用下的有限元模型,重点讨论边载距离和大小对桩侧负摩阻力影响规律以及桩长和边载距离对桩侧负摩阻力影响规律;同时引进曲线拟合系数,通过大量的数据研究拟合出了不同边载组合的一般公式,并验证公式的准确性。

1 有限元模型

1.1 模型建立

假定地基是分层均质、横观各向同性的连续介质,各土层面之间始终保持粘结接触,能够协调变形;桩体为理想弹性材料,弹性模量 E 为30 GPa,泊松比 μ 为0.2,桩径 D 为0.5 m。桩体单元类型采用CAX8R单元;土体为服从Mohr-Coulomb屈服准则^[12]的弹塑性材料,土体单元类型采用CAX4单

元。考虑到模型的真实性和计算效率,桩侧土体宽度取25倍桩径左右,桩端以下土体取1倍桩长。根据轴对称性,建立桩土模型,见图1。模型中土体侧向约束水平位移,土体底部约束水平位移和竖向位移。

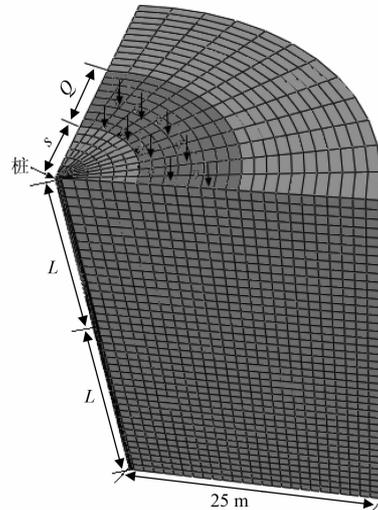


图1 桩土有限元模型及边载施加示意图

为了说明桩土之间的相对滑动,采用有限元的罚函数法来模拟桩土体之间的接触问题,通过在桩土界面处设置主-从接触,采用扩展的库伦摩擦模型进行接触分析,其剪应力和剪切位移之间的关系如图2所示。

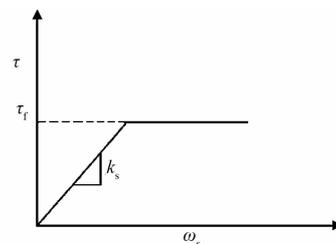


图2 库伦摩擦模型中的剪应力与剪切位移关系

桩土之间许用摩擦力由式(1)确定,

$$\tau_f = \min(\mu p, \tau_{\max}) \quad (1)$$

式中 $\mu = \tan\delta$ 是摩擦系数, p 为接触面上的压力, τ_{\max} 为用户指定土层的极限摩阻力。

桩土之间的摩擦角 δ 是影响摩擦桩承载性能的关键因素,采用Randolph和Wroth^[13]建议的计算式来估算,如式(2)。

$$\delta = \tan^{-1}(\sin\varphi \times \cos\varphi / (1 + \sin^2\varphi)) \quad (2)$$

对于土体的摩擦角 φ 范围 $15^\circ \sim 30^\circ$,那么桩土界面的摩擦角 δ 的范围为 $13.2^\circ \sim 19.1^\circ$,则摩擦系数 $\mu = 0.234 \sim 0.346$ 。

1.2 模型有效性验证

为了验证模型建立的有效性,选取南通某桥梁

工程实例^[14]进行模拟。该桥梁工程试桩共为 6 根钻孔灌注桩,其中北岸 3 根。选用北岸 1# 试桩进行对比分析,该试桩桩长 76 m,直径 1 m。桩基所处主要土层材料参数见表 1。

表 1 土体材料参数

土体	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	μ	c / kPa	$\varphi / (^{\circ})$
粉砂	18.9	60	0.35	13.0	27.0
亚粘土	19.1	72	0.41	83.0	18.4

基于该实例所建立的模型主要用来验证竖向荷载作用下桩基沉降曲线(见图 3)。模拟的桩顶沉降位移与实测值趋势一致,即基于 ABAQUS 的数值模拟能得到比较满意的结果。

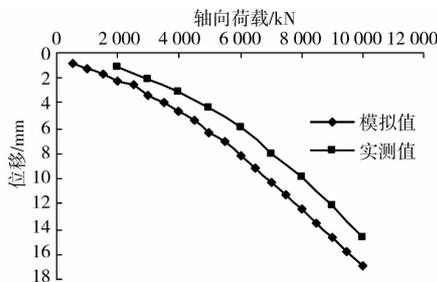


图 3 桩的荷载位移曲线

1.3 计算边界条件及材料参数

为研究边载距离、边载大小和桩长对桩侧摩阻力的影响规律,模拟计算了不同边载距离 s (2~17 m)、边载大小 Q (10~180 kPa)和桩长 L (10~20 m)不同组合的情况。在土体表面施加边载,边载 Q 作用区域取 8 m,相关的边载施加示意图见图 1,土体物理参数见表 2。

表 2 土体材料参数

土体	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	μ	c / kPa	$\varphi / (^{\circ})$
桩侧	18	5.0	0.35	3.0	20
桩端	18	50.0	0.30	0.1	35

2 计算结果与分析

为了验证边载大小对桩身摩阻力分布以及中性面位置的影响,考虑在桩周不同的区域布置边载,研究在同一区域不同的边载的影响。通过模拟可知当在边载作用区域特定时,保持其他参数条件不变,增大边载,桩身负摩阻力分布范围增大,即桩身所承受的额外下拽力增大;中性面同比下移幅度越小,这是因为土趋于完全固结的缘故,与实际符合(如图 4 所示)。

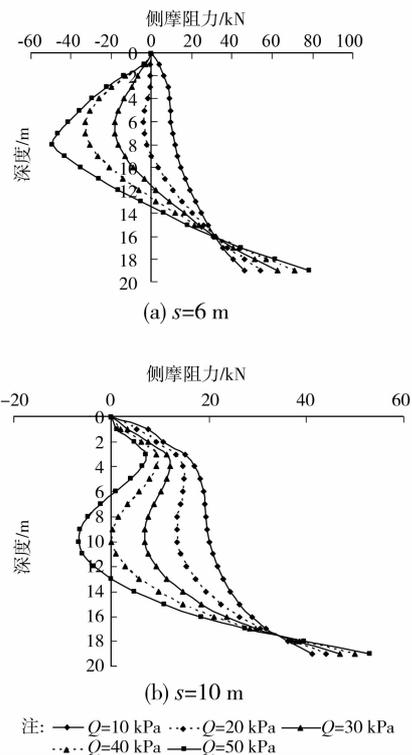


图 4 不同边载大小下桩侧摩阻力随深度变化曲线

为了验证边载分布区域距桩侧的距离对桩身摩阻力分布影响,考虑同样边载大小但不同的边载距离。当边载大小一定时,增大边载距离 s ,桩身负摩阻力分布范围相应减小,当边载在一定区域外,桩身无负摩阻力(如图 5 所示)。

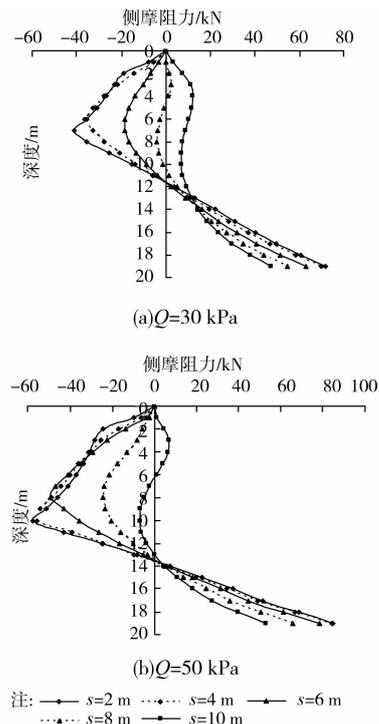


图 5 不同边载距离下桩侧摩阻力随深度变化曲线

2.1 边载距离和大小对桩侧负摩阻力影响规律分析

为研究不同边载距离和边载大小的组合关系对桩侧负摩阻力的影响规律,首先找出相同负摩阻力情况下边载距离和边载大小之间的关系。这里取桩侧负摩阻力分别为几组的情况进行分析。

图6为桩侧负摩阻力分别取 -110 kN 、 -70 kN 和 -22 kN 情况下边载距离与边载大小的关系曲线,以及根据数值试验拟合出的曲线,拟合出关系式分别为式(3)、(4)、(5)。

$$Q = 13.1416 + 0.039527s^3 \quad (3)$$

$$Q = 13.9936 + 0.046038s^3 \quad (4)$$

$$Q = 12.0871 + 0.0330134s^3 \quad (5)$$

由图6可以看出数值模拟计算结果与拟合曲线吻合较好, Q (kPa)和 s (m)之间保持 $k = s^3/(Q-13)$ 为常数,可以得到相同的桩侧负摩阻力。

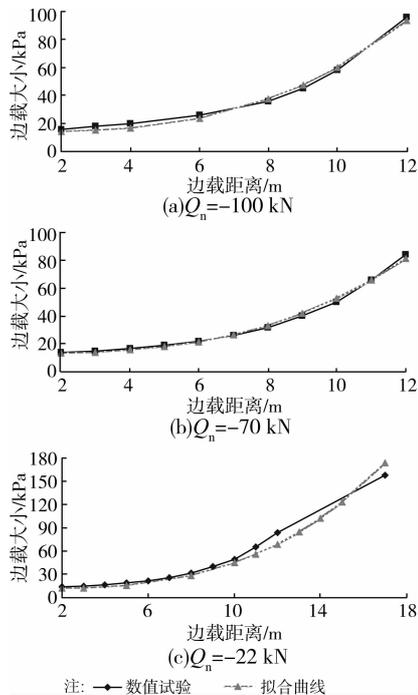


图6 数值试验结果与拟合曲线比较

图7为以 $k = s^3/(Q-13)$ 为横坐标,以桩侧负摩阻力为纵坐标得到关系曲线,由图可知,桩侧负摩阻力随着 k 值的增大而减小,当 k 值增加至32时桩侧负摩阻力趋于0。

2.2 桩长和边载距离对桩侧负摩阻力影响规律分析

考虑到土体作用的连续性,桩身越长,桩身与土体接触范围大,土体对于桩基的作用越明显。鉴于此,分析不同桩长的桩基在边载作用下的桩侧摩阻力变化规律。

通过分析多种桩长的桩基在边载作用下桩身负摩阻力的变化规律,当桩侧负摩阻力为一定值时,桩

长(L)和边载距离(s)的分布具有一定的规律性。取桩侧负摩阻力(Q_n)分别为 -110 kN 、 -70 kN 以及 -30 kN 时进行 L (m)与 s (m)的曲线拟合,拟合曲线与数值试验的对比见图8。

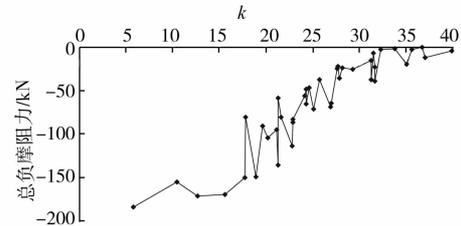


图7 桩侧负摩阻力随 k 分布图($k = s^3/(Q-13)$)

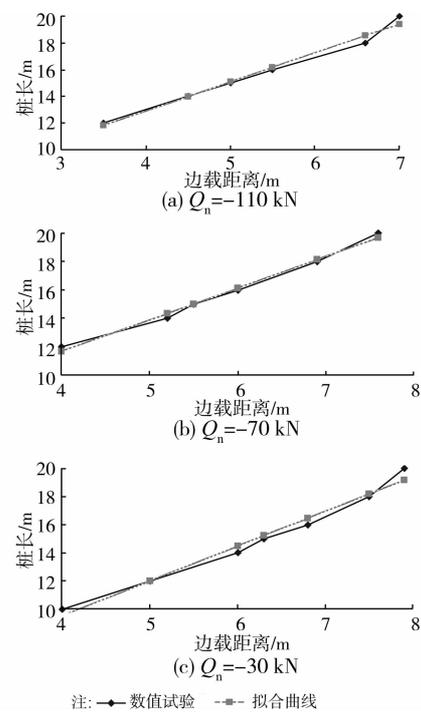


图8 数值试验结果与拟合曲线比较

根据数值模拟获得 $Q_n = -110\text{ kN}$ 时数据拟合出关系式为:

$$L = 4.260 + 2.163x \quad (6)$$

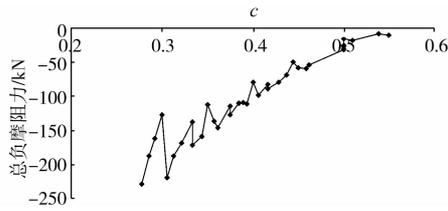
同理拟合 $Q_n = -70\text{ kN}$ 和 $Q_n = -30\text{ kN}$ 的关系式:

$$L = 2.762 + 2.228x \quad (7)$$

$$L = -0.331 + 2.467x \quad (8)$$

由图8可以看出数值模拟计算结果与拟合曲线吻合较好, L (m)和 s (m)之间保持 $c = s/(L-2)$ 为常数,可以得到相同的桩侧负摩阻力。

图9为以 $c = s/(L-2)$ 为横坐标,以桩侧负摩阻力为纵坐标得到关系曲线,由图可知,桩侧负摩阻力随着 c 值的增大而减小,当 c 值增加至0.5时桩侧负摩阻力趋于0。

图9 桩侧负摩阻力随 c 分布图 ($c=s/(L-2)$)

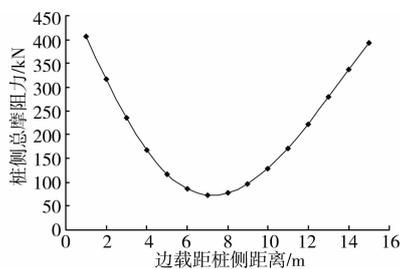
3 回归分析

通过对边载参数影响因素的分析,发现边载影响因素对于桩侧摩阻力的变化具有一定的规律性,而这个规律基于边载大小和边载分布区域距桩侧的距离两者的共同作用,为了研究边载大小和边载分布区域距桩侧的距离共同对桩侧摩阻力的影响,引进边载系数 N_{sq} ,如式(9),

$$N_{sq} = \frac{s\gamma}{Q} \quad (9)$$

式中 γ 为土的重度。

为了分析所提出的一般规律,基于边载系数 N_{sq} 进行边载效应的分析,取 $N_{sq} = 3.6$ 进行特例分析,主要是为了判别边载大小和边载分布区域距桩侧的距离 s 对桩身侧摩阻力影响程度的大小。

图10 总摩阻力随边载距桩侧距离 s 变化曲线

由图10可知,在相同的边载系数 N_{sq} 下,桩侧总摩阻力符合一定的规律,为了研究更多形式的边载大小和边载的分布区域距桩侧的距离组合对桩身侧摩阻力的影响,对不同的 N_{sq} 进行参数拟合分析,并据此拟合出桩侧总摩阻力的求解公式。在进行曲线拟合分析时,采用最小二乘法的原理,编制简单的计算程序。该程序可以对多种函数进行单独拟合或者进行函数组合拟合。考虑到研究对象符合抛物线,故采用幂函数的组合进行拟合。

上文已经得出了当 $N_{sq} = 3.6$ 时桩侧总摩阻力 P_c 随边载距桩侧距离 s 变化曲线,基于该曲线上的数据点运用编制程序得到拟合公式如式(10):

$$P_c = \begin{cases} P_{c0} & s = 0 \\ 6.1s^2 - 96.6s + 471.6 & 0 < s < 16 \text{ m} \\ P_{c0} & s > 16 \text{ m} \end{cases} \quad (10)$$

其中 P_{c0} 为最大桩侧摩阻力。

通过大量的模拟分析可以发现,边载作用下桩侧摩阻力所提供的承载力 P_c 在 N_{sq} 一定时符合一定的规律,即随着边载距离 s 增加,承载力 P_c 先逐渐变小达到某一最小值,然后逐渐增大,直至不受边载效应的影响,基本符合抛物线变化。对于不同的 N_{sq} ,同样符合上述规律,只是抛物线的形状不同而已。因此定义符合一般规律的一元二次函数,见式(11)。

$$P_c = As^2 - Bs + C \quad (11)$$

为了得出对工程更有意义的结果,考虑到实际附加边载大小和边载分布范围距桩侧的距离的不同组合,还对不同的 N_{sq} 下幂函数系数进行曲线拟合,以便对于不同的边载组合形式进行选择。在对不同的 N_{sq} 曲线拟合时,同样采用最小二乘法原理编制程序进行。考虑到研究对象(即一元二次函数系数)符合幂函数和对数函数的变化规律,故采用幂函数和对数函数的组合进行拟合。先对二次项系数 A 进行曲线拟合,式(12)为采用对数函数和幂函数组合进行曲线拟合的结果。

$$A = -0.065 \times \left(\frac{Q}{s}\right)^2 - 2.295 \times \left(\frac{Q}{s}\right) - 0.089 - 2.255 \ln\left(\frac{Q}{s}\right) \quad (12)$$

下面对一次项系数 B 进行曲线拟合,式(13)为采用对数函数和幂函数组合进行曲线拟合的结果。

$$B = -1.082 \times \left(\frac{Q}{s}\right)^2 + 40.151 \times \left(\frac{Q}{s}\right) + 4.904 - 50.894 \ln\left(\frac{Q}{s}\right) \quad (13)$$

考虑到常数项系数变化不大,不对其进行曲线拟合,结合大量的模拟分析发现常数项系数近似于 P_{c0} ,一般可以取折损 5%~10%后的 P_{c0} ,即

$$C = [1 - (5\% \sim 10\%)] \times P_{c0} \quad (14)$$

取 $N_{sq} = 3$ 进行特例分析,验证上述公式的精确性。对比分析见图11,可见该式具有较好的精确性。

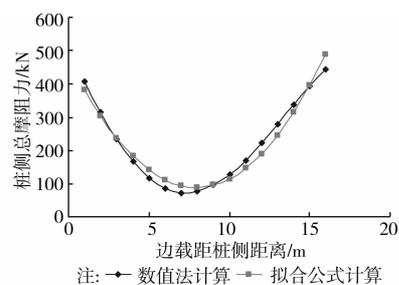


图11 数值试验结果与拟合公式比较

4 结论

根据大量的模拟计算分析,得到边荷载作用下

桩侧总摩阻力随边载变化的一般规律。即在不同的边载大小和边载分布区域距桩侧的距离组合情况下,桩侧总摩阻力随边载距离 s 的分布为抛物线。

边载作用将导致桩基承载力下降。随着边载增大,桩周的土体固结增大,导致桩身所承受的额外下拽力增大,即桩侧负摩阻力增加,桩侧摩阻力提供的正摩阻力减小,导致桩基承载力下降。这使桩更容易因为强度不足导致材料破坏或结构破坏。

随着边载与桩距离的增大,边载效应减弱,桩身负摩阻力分布范围相应减小,当边载达到一定距离,边载与桩之间距离达到极限时,桩身负摩阻力影响趋于零。边载与桩之间的距离极限值还取决于边载大小及桩长。

边载距离 s 和边载大小 Q 的相对关系为 $k = s^3 / (Q - 13)$, 桩侧负摩阻力随着 k 值的增大而减小,当 k 值增加至 32 时桩侧负摩阻力趋于 0。

桩长 L 和边载距离 s 的相对关系为 $c = s / (L - 2)$, 桩侧负摩阻力随着 c 值的增大而减小,当 c 值增加至 0.5 时桩侧负摩阻力趋于 0。

工程中应该注意边荷载在相对关系 k 及 c 的范围以外,则可避免边载作用而导致桩基承载力下降的问题。

参考文献:

- [1] Bransby M F, Springman S M. 3-D finite element modeling of pile groups adjacent to surcharge loads [J]. Computers and Geo-technique, 1996, 19(4): 301-324.
- [2] Lee C J. Development of downdrag on piles and pile groups in consolidation soil [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2004, 130(9): 905-914.
- [3] Taciroglu E, Rha C S, Wallace J W. A robust macroelement model for soil-pile interaction under cyclic Loads [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(10): 1304-1314.
- [4] Comodromos E M. Response prediction for horizontally loaded pile groups [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29: 597-625.
- [5] Adel M, Hanna A S. Drag force on single piles in clay subjected to surcharge loading [J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(2): 89-96.
- [6] Lam S Y, Ng W W, Leung C F, et al. Centrifuge and numerical modeling of axial load effects on piles in consolidation ground [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(1): 10-24.
- [7] Matyas E L, Santamarina L C. Negative skin friction and the neutral plane [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 591-597.
- [8] 赵明华,刘思思. 多层地基单桩负摩阻力的数值模拟计算[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 336-340.
- ZHAO Minghua, LIU Sisi. Numerical simulation of negative skin friction on single pile in multiple layer deposits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 336-340.
- [9] Lee, C J, Bolton, M D. Numerical modeling of group effects on the distribution of drag-loads in pile foundations [J]. Geotechnique, 2002, 52(5): 325-335.
- [10] 律文田,冷伍明. 软土地区桥台桩基负摩阻力试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005(6): 642-645.
- LYU Wentian, LENG Wuming. In-situ tests on negative friction resistance of abutment piles in soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(6): 642-645.
- [11] 魏鉴栋,凌道盛,陈云敏. 受大面积堆载影响负摩擦桩的 Q-S 曲线分析 [J]. 浙江大学学报, 2007, 41(1): 166-170.
- WEI Jiandong, LING Daosheng, CHEN Yunmin. Analysis of Q-S curve on negative frictional pile under large-scale vertical loads [J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 41(1): 166-170.
- [12] 朱向荣,王金昌. ABAQUS 软件中部分土模型简介及其工程应用 [J]. 岩土力学, 2004, 25: 144-148.
- ZHU Xiangrong, WANG Jinchang. Introduction to partly soil models in ABAQUS software and their application to the geotechnical engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25: 144-148.
- [13] Randolph M F, Wroth C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles [J]. Geotechnique, 1981, 31(1): 143-15.
- [14] 陈晶. 基于 ABAQUS 的桩侧摩阻力仿真分析 [J]. 长春工业大学学报, 2006, 27(1): 27-29.
- CHEN Jing. Simulation of pile friction based on ABAQUS [J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 27(1): 27-29.