

文章编号: 1000-7598(2012)03-0887-06

带承台群桩负摩阻力性状的三维有限元分析

夏力农^{1,2}, 苗云东¹, 谈铁强²

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 长沙学院 土木工程系, 长沙 410003)

摘要: 无承台群桩中各桩的桩-土相互作用是相互独立的, 带承台群桩的桩-土相互作用要受到承台的约束。简要分析了带承台群桩负摩阻力变化的机制。采用三维有限元分析了地下水位下降条件下带承台群桩的负摩阻力性状。分析结果表明, 带承台群桩的负摩阻力与单桩负摩阻力总体相近, 随着上部荷载的增大, 中性点上升, 附加沉降增加, 下拉力减小, 只是各位置桩有差异。荷载不大时, 承台对各位置桩沉降的约束明显, 各桩中性点几乎重叠。随着荷载的增加, 承台本身变形增加, 中性点的差异逐渐变得明显, 角桩中性点位置最低, 边桩次之, 中心桩最高。带承台群桩中各桩的负摩阻力沿着深度的发挥程度不同。角桩负摩阻力发挥最为充分, 边桩次之, 中心桩最小。

关键词: 带承台群桩; 地下水位下降; 负摩阻力; 性状; 有限元法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Three-dimensional finite element analysis of negative skin friction behaviors in pile groups with cap

XIA Li-nong^{1,2}, MIAO Yun-dong¹, TAN Tie-qiang²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;

2. Department of Civil Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China)

Abstract: The pile-soil interactions are constrained by the pile cap in pile groups with cap, while mutually independent in pile groups without cap. The mechanism of negative skin friction variation in pile groups with cap is analyzed briefly. Under the condition of groundwater level falling, the negative skin friction behaviors of pile groups with cap are analyzed by three-dimensional finite element method. The analytical results show that the negative skin friction of pile groups with cap is generally similar to that of a single pile; as the loads on cap increasing, the neutral point moves up, additional settlement increases and the downdrag decreases, though there are differences between piles in different positions. The constraints of settlement of piles in various positions by the cap are significant when the load is not large; so that the neutral point of piles are almost coincident. As the load increasing, the deformation of the cap increases and the neutral points of piles become more various, lowest for the corner pile, second for the perimeter pile and highest for the center pile. The negative skin friction of each pile in pile groups with cap mobilizes differently along the depth. It is mobilized most fully for the corner pile, second for the perimeter pile and least for the center pile.

Key words: pile groups with cap; groundwater level falling; negative skin friction; behavior; finite element method

1 引言

随着国民经济的快速发展, 高层建筑的数量与日俱增, 桩基础作为建筑地基越来越普遍。尤其在超高层建筑和软土地区中, 桩基础是主要的基础形式。桩基础支撑上部建(构)筑物荷载主要由桩身周围土的摩擦力和桩端阻力两部分组成。由于地面堆载和地下水位下降等原因造成桩周土体沉降大于

桩基沉降时, 桩周将产生负摩阻力^[1-2]。桩侧负摩阻力会使桩基的荷载增加, 有效承载力下降或者桩基的沉降增大, 严重的还会影响到建(构)筑物的正常使用甚至结构安全^[3-4]。

在实际的桩基础工程中, 除了少数采用大直径单桩基础以外, 一般采用的都是群桩基础。大量模型试验和工程实测均表明, 群桩基础工作性状明显区别于单桩, 它受群桩-土-承台共同作用的影响^[5]。

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 长沙市科技计划项目; 长沙学院引进人才科研基金。

第一作者简介: 夏力农, 男, 1964年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地基处理方面的教学科研。E-mail: lnxia@126.com

由于桩基负摩阻力问题的复杂性,目前国内外学者对于桩基负摩阻力特性的研究主要集中在单桩和无承台群桩情况下的研究^[6-14],对于带承台群桩的负摩阻力特性的研究很少^[15]。本文在前人研究的基础上采用有限元方法对地下水位下降条件下带承台群桩的负摩阻力进行了模拟,讨论了不同承台均布荷载作用下地下水位下降引起的带承台群桩负摩阻力特性变化。

2 机制分析

在地下水位下降的条件下,带承台群桩基础中桩-土-承台的相互作用比正常使用过程复杂。

2.1 群桩的负摩阻力

国内外研究已经证实,群桩的负摩阻力整体上与单桩负摩阻力的发展变化规律是一致的。在地面堆载作用下桩周土体沉降时,由于群桩外围桩的阻隔作用,使得群桩包围的核心部分土体沉降与外部沉降不同,进而使群桩中角桩、边桩和中心桩的负摩阻力有所区别。一般表现为角桩、边桩的负摩阻力作用大于中心桩的负摩阻力,角桩、边桩的中性点位置比中心桩中性点位置更深。

2.2 承台的作用

带承台群桩与不考虑承台作用的群桩、完全刚性承台的群桩以及完全柔性承台的群桩都是不一样的。

在没有承台的群桩中,桩周土体沉降时,各位置桩在负摩阻力作用下的附加沉降是独立的,受到的负摩阻力的影响是彼此独立的,相互影响和作用很小,完全柔性承台下的群桩也是如此。

完全刚性承台下的群桩负摩阻力就不是这样了。在这种情况下,由于刚性承台的作用,在桩周土体沉降的作用下,承台下各位置桩的附加沉降都是相同的。刚性承台约束各位置桩顶沉降的同时,还对各位置桩分担的荷载进行了再分配。从桩-土相对位移分析,这就意味着在桩周土体沉降作用下,角桩、边桩与中心桩的负摩阻力的区别主要是由于桩周土体沉降的不一致而造成的,各位置桩的桩顶沉降由于刚性承台的作用是相同的。

在实际工程中,承台既不是柔性的,也不是完全刚性的。这就决定了实际工程中带承台群桩具有一定的约束各位置桩沉降的作用,其约束作用小于刚性承台对于群桩沉降的约束,这也会引起桩周土体沉降造成的各位置桩的负摩阻力的变化。承台下各位置桩负摩阻力的差异既要受到桩周土体沉降不均匀的影响,还会受到各位置桩的沉降不均匀的影

响。其负摩阻力的发展变化比无承台群桩和刚性承台群桩更为复杂。

3 三维有限元分析

为了研究带承台群桩负摩阻力发展变化的影响,利用岩土专业有限元分析软件 PLAXIS 建立了一个带承台群桩模型。在地下水位下降的条件下使桩周土体沉降并在桩周产生负摩阻力,比较不同承台均布荷载条件下带承台群桩中各桩的负摩阻力分布与发挥、桩土位移、中性点位置和桩身最大轴力的变化,探求带承台群桩中负摩阻力的变化发展规律及影响。

带承台群桩模型的长、宽都为 50 m,高为 25 m (其中黏土层为 20 m,砂土层为 5 m)。土体的本构关系采用弹塑性 Mohr-Coulomb 模型,混凝土桩体采用线弹性模型。桩土界面采用接触面单元进行模拟,采用 15 节点楔形单元离散土体。在模型 4 个垂直边界上采用滚支约束,在底部边界固支约束。本文所采用的群桩 3×3 平面布置如图 1 所示,图中 i、p、c 桩分别代表中心桩、边桩、角桩。土体及带承台群桩的网格划分如图 2 所示。

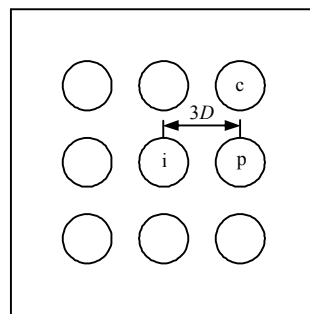


图 1 群桩平面布置
Fig.1 Location of pile groups

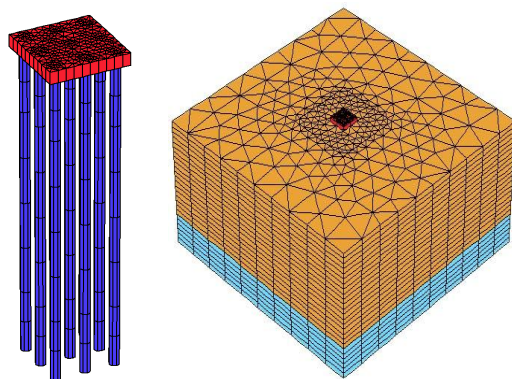


图 2 单元网格划分
Fig.2 Subdivision of element meshes

承台尺寸为 4 m×4 m×0.8 m, 承台混凝土强度

等级采用 C25。基桩直径为 $\phi 500$ mm, 桩长为 20 m, 桩间距为 1 500 mm, 桩身混凝土强度等级采用 C20, 沿着桩身的土层分布及土体的物理力学参数见表 1。加载次序模拟带承台群桩的实际工作情况, 在地下水位变化之前, 先施加不同的上部荷载, 然后将地下水从地表 0 m 下降到地表下 4 m 位置稳定下来。以此来研究地下水位下降条件下带承台群桩的负摩阻力变化。

表 1 土层分布及物理力学指标
Table 1 Soil layer distribution and physico-mechanical indices

土层名称	土层厚度/m	干重度 $\gamma_d/(\text{kN}/\text{cm}^3)$	饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}/\text{cm}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	泊松比 ν	压缩模量 E_s/MPa
黏土	20	15	18	3	20	0.3	5
砂土	≥ 5	17	20	1	32	0.3	15

4 结果分析

有限元的结果表明, 在地下水位下降的条件下, 桩顶荷载对于带承台群桩负摩阻力的影响与对于单桩负摩阻力的影响是有差异的。

4.1 负摩阻力的分布与发挥

从图 3 可以看出, 在不同的上部荷载 N 作用下, 群桩中各桩桩身负摩阻力都呈现出不同的分布形态。

在地下水下降前, 由于承台的作用, 群桩中各桩体上部桩-土相对位移较小, 导致其桩侧正摩阻力未能充分发挥。随着距桩顶距离的增加, 正摩阻力逐渐得以充分发挥, 呈现上小下大的分布形式。由于受群桩-土-承台共同作用的影响, 在不同的上部荷载作用下均表现为群桩中角桩桩侧正摩阻力发挥大于边桩和中心桩相应深度的正摩阻力值, 边桩桩侧正摩阻力的发挥大于中心桩相应深度的正摩阻力值。这种差异随着上部荷载的增加变得越来越明显。从群桩中各桩桩侧的正摩阻力的发挥过程可以看出, 在相同的上部荷载作用下, 群桩中各桩的桩顶荷载分配不均匀, 角桩分配荷载最大, 边桩次之, 中心桩最小。

在地下水位下降后, 土体达到完全固结状态时, 群桩中各桩桩身上部均出现负摩阻力, 且负摩阻力均随着上部荷载的增加而减小。由于群桩-土-承台共同作用的影响, 群桩中角桩桩侧的正负摩阻力发挥最为充分、边桩次之、中心桩最小。

从图 3 可以看出, 当上部荷载较小时, 群桩中各桩桩身下部的正摩阻力发挥程度较低, 随着上部

荷载的提高, 正摩阻力发挥程度逐渐提高。单桩负摩阻力的研究也得到类似的结论^[3], 从而说明单桩的研究成果在一定程度上反映了群桩的总体趋势。

从图 3 可以看出, 当上部荷载较小, 并且在相同的上部荷载作用时, 群桩中各桩桩身上部一定范围内的负摩阻力基本重合, 只有在靠近中性点一定范围内的桩侧部分出现了明显的角桩负摩阻力发挥大于边桩和中心桩相应深度的负摩阻力值, 中心桩负摩阻力最小。随着上部荷载的增大, 这种重合现象逐渐消失, 即群桩中各桩桩侧上部也逐渐表现出明显的差异。

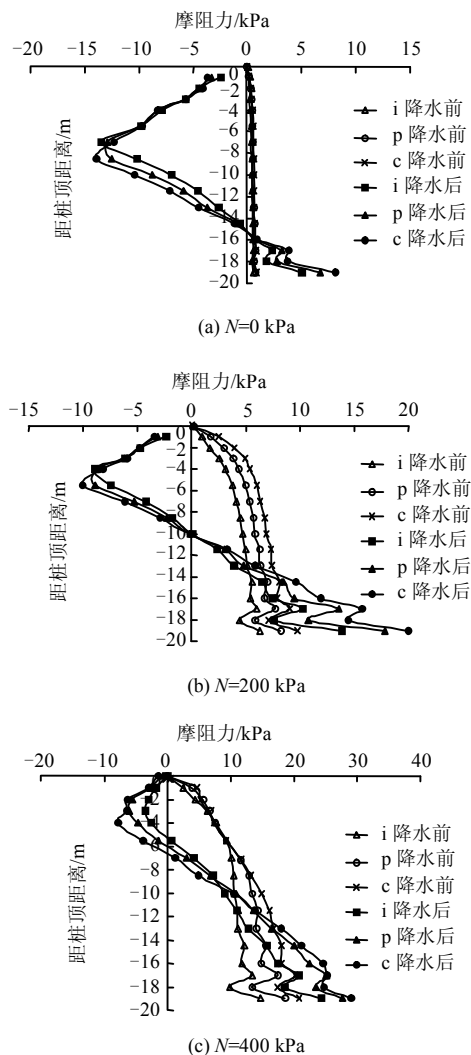


图 3 降水前后摩阻力分布图

Fig.3 Distributions of skin friction before and after precipitation

4.2 沉降特性

在没有承台的调节作用时, 群桩中各桩的沉降是相互独立的, 彼此没有明显的约束。而在带承台的群桩中, 各桩的沉降由于受到承台的约束, 沉降变得比较均匀, 角桩、边桩和中心桩之间的沉降差

异很小。

图 4 为地下水位下降后, 土体达到完全固结状态时, 不同上部荷载与沉降的关系曲线。表 2 给出了群桩中各桩沉降变化情况表。可以看出, 当上部荷载较小时, 由于承台的约束作用, 角桩、边桩、中心桩的沉降基本相等, 随着上部荷载的增大, 群桩中各桩的沉降表现出较小的差异, 角桩的沉降大于边桩的沉降, 边桩大于中心桩的沉降。这与文献[6]群桩中各桩桩顶完全自由和文献[7]群桩中各桩桩顶采用绝对刚性连接有着显著的区别, 本文的结果更接近实际情况。

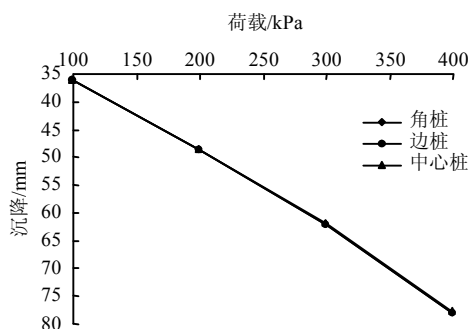


图 4 荷载与沉降的关系

Fig.4 Relations between load and settlement of piles

表 2 各桩沉降变化表

Table 2 Table of settlement variation of piles

上部荷载/kPa	桩的沉降/mm		
	中心桩	边桩	角桩
100	36.13	36.18	36.18
200	48.69	48.79	48.79
300	62.05	62.19	62.22
400	77.73	78.00	78.09

从图 5 可以看出, 当上部荷载为 400 kPa 时, 地下水位下降并达到完全固结的程度后, 同一深度群桩包围的核心部分土体沉降与群桩外部土体沉降有着明显的差异, 群桩外围桩对群桩内部有着明显的阻隔作用, 这是造成群桩中角桩、边桩、中心桩的摩阻力分布不同的主要原因之一。

4.3 中性点位置

从图 6 可以看出, 上部荷载对中性点位置的影响。当无上部荷载时, 中心桩、边桩、角桩的中性点位置均为 15.5 m; 当上部荷载为 200 kPa 时, 中心桩、边桩、角桩的中性点均位置为 13 m; 当上部荷载为 400 kPa 时, 中心桩、边桩、角桩的中性点位置分别为 5.40、6.04、6.63 m。群桩中各桩的中性点随着上部荷载的增加逐渐上升。当上部荷载较小时, 群桩中各桩的中性点几乎重叠。随着上部荷载的增大, 中心桩的中性点高于相同上部荷载作用

下边桩和角桩的中性点, 角桩的中性点最低。

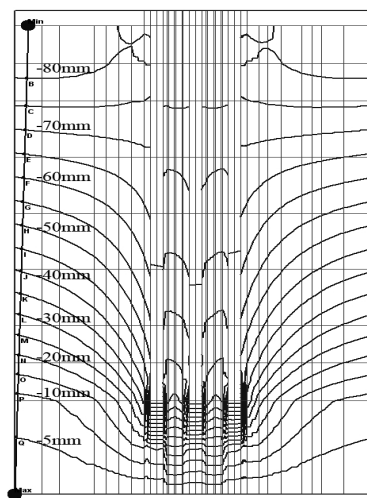


图 5 降水后桩-土位移分布图 ($N=400$ kPa)

Fig.5 Distribution of pile-soil displacement after precipitation ($N=400$ kPa)

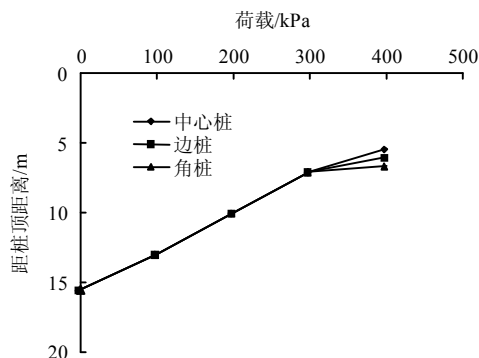


图 6 荷载与中性点位置的关系

Fig.6 Relations between load and location of neutral point in piles

4.4 桩身最大轴力变化

图 7 反映了不同的上部荷载作用下, 降水前后群桩中各桩的桩身最大轴力变化。从图 7 中可以看出, 在不同的上部荷载作用下, 尽管群桩中各桩的桩身最大轴力值有区别, 降水后的群桩中各桩的桩身最大轴力值大于降水前相对应桩的桩身轴力最大值。但群桩中各桩的桩身最大轴力随着上部荷载的变化呈现相似的趋势。

当上部荷载较小时, 降水后由于负摩阻力引起的群桩中各桩桩身最大附加应力较大。这是由于随着上部荷载的增加, 群桩中各桩的中性点均向上移动, 负摩阻力减少, 导致桩身最大附加应力减小。

4.5 承台对负摩阻力发挥的影响

在本文的分析中, 承台对于群桩负摩阻力的发挥有一定的影响。

在分析的全过程中, 承台与其下的土体都没有

出现脱开的现象。承台下土体承担着不同比例的上部荷载。

承台的作用基本上不会影响桩周土体的沉降,而只会影响各位置桩的沉降,通过这样的途径改变桩-土相对位移,改变各位置桩的负摩阻力的发挥。在上部荷载小于 300 kPa 时,各位置桩的沉降几乎相同,其中性点位置也几乎相同,变化很小。当在上部荷载为 400 kPa 时,各位置桩的沉降开始出现较明显的差异,中性点位置的变化也开始变得较为明显。这是由于承台的刚度是有限的,在荷载较小时,承台本身的变形很小,基本上可以忽略不计,而当荷载较大时,承台本身也开始出现一定的变形,从而引起各位置桩的沉降开始出现差异。进而引起了各位置桩的负摩阻力的发挥出现差异。

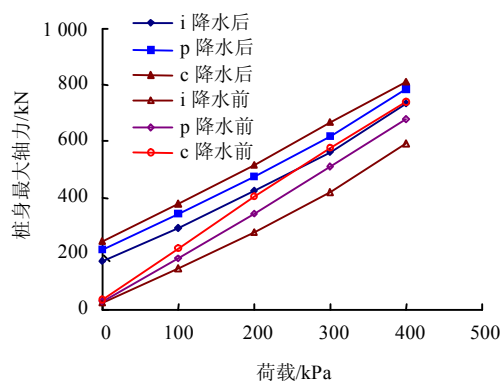


图7 荷载与最大轴力的关系

Fig.7 Relations between load and maximum axial force

5 结 论

(1) 承台的作用,约束了各位置桩的沉降,使各位置桩的负摩阻力发挥发展不再是相对独立的,而是在承台的约束下各位置桩沉降差异很小前提下的相互关联、相互协调、相互作用下的发挥。

(2) 在不同的上部荷载作用下,带承台群桩的负摩阻力总体表现与单桩负摩阻力相近。随着上部荷载的增大,中性点位置上升,附加沉降增加,下拉力减小,只是各位置桩略有差异。

(3) 在上部荷载不大时,承台对各位置桩沉降的约束很明显,各位置桩的沉降几乎是相等的,中性点位置几乎重叠。荷载增加到一定程度,承台本身变形增加,各位置桩的沉降差异显现出来,中性点位置的差异变得较为明显,角桩中性点位置最低,边桩次之,中心桩中性点位置最高。

(4) 在各级上部荷载作用下,带承台群桩中各位置桩的负摩阻力发挥程度不同。角桩负摩阻力发挥最为充分,边桩次之,中心桩最小。

参 考 文 献

- [1] FELLENIUS B H. Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(4): 409—430.
- [2] POULOS H Q, Mattes. The development of negative skin friction with time in end-bearing piles[J]. **Australian Geomechanics Journal**, 1972, 2(1): 11—20.
- [3] 夏力农. 桩基负摩阻力特性的理论与试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [4] 夏力农, 柳红霞, 欧名贤. 垂直受荷桩负摩阻力时间效应的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(6): 1177—1182.
XIA Li-nong, LIU Hong-xia, OU Ming-xian. Experimental research on time effects of negative skin friction behaviors of vertical-loaded piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1177—1182.
- [5] 贺武斌, 贾军刚, 白晓红, 等. 承台-群桩-土共同作用的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(6): 710—715.
HE Wu-bin, JIA Jun-gang, BAI Xiao-hong, et al. The experimental study of cap-pile groups-soil interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 710—715.
- [6] LEE C J, BOLTON M D, AL-TABBAA A. Numerical modeling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(5): 325—335.
- [7] COMODROMOS E M, BAREKA S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2005, 32(4): 210—221.
- [8] CHOW Y K, LIM C H, KARUNARATNE G P. Numerical modeling of negative skin friction on pile group[J]. **Computers and Geotechnics**, 1996, 18(3): 201—224.
- [9] POULOS H G. Piles subjected to negative friction: A procedure for design[J]. **Geotechnical Engineering**, 1997, 28(1): 23—44.
- [10] FELLENIUS B H. Recent advances in the design of piles for axial loads, dragloads, downdrag, and settlement[C]// *Proceedings of a Seminar by American Society of Civil Engineers*. New York: ASCE, 1998: 19—37.

- [11] 陈福全, 龚晓南, 马时冬. 桩的负摩阻力现场试验及三维有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3): 77—80.
CHEN Fu-quan, GONG Xiao-nan, MA Shi-dong. Field measurements and 3-D FEM analysis of negative skin friction on piles[J]. **Journal of Building Structures**, 2000, 21(3): 77—80.
- [12] 夏力农, 苗云东, 刘小平. 加载次序对湿陷性黄土中桩基承载力检测的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 318—322.
XIA Li-nong, MIAO Yun-dong, LIU Xiao-ping. Influences of loading sequences on bearing capacity test of piles in collapsible loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Suup.2): 318—322.
- [13] 齐静静, 徐日庆, 龚维明. 湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力问题的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 881—884.
QI Jing-jing, XU Ri-qing, GONG Wei-ming. Experimental study of negative skin friction resistance of piles in collapsible loess area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.): 881—884.
- [14] 杨庆, 孔纲强, 郑鹏一, 等. 堆载条件下单桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2805—2810.
YANG Qing, KONG Gang-qiang, ZHENG Peng-yi, et al. Model test study of negative skin friction for single pile under surface load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2805—2810.
- [15] LEE C J, LEE J H, JEONG S. The influence of soil slip on negative skin friction in pile groups connect to a cap[J]. **Geotechnique**, 2006, 56(1): 53—56