

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-722-06

桩-土界面特性对砂土地基中抗拔桩承载特性影响的模型试验研究

罗耀武^{1,2}, 胡 琦³, 凌道盛¹, 陈 峥⁴, 陈云敏¹

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003;
3. 浙江工业大学, 杭州 310014; 4. 华东电力设计院, 上海 200063)

摘 要: 针对砂土地基中不同 L/d 的抗拔桩进行了模型试验, 模型桩采用了 3 种不同界面, 结合界面剪切试验探讨了桩-土界面特性对抗拔桩荷载-位移曲线、极限承载力及残余承载力的影响, 得到了以下几点结论: 模型桩长径比 L/d 不同时, 每种界面抗拔桩荷载-位移曲线是类似的, 光滑钢桩上拔力达极限承载力后保持不变, 粗糙界面模型桩上拔力达极限承载力后降低, 直至达残余承载力; 抗拔桩达极限承载力时的静止土压力系数 K 受桩-土界面粗糙程度的影响, 界面越粗糙, K 值越大; 界面越粗糙, 抗拔桩残余承载力与极限承载力的比值越小, 该比值随 L/d 的变化较小; 对于粗糙界面抗拔桩, 残余承载力与极限承载力的差别一部分是由于桩-土界面摩擦角的降低引起的, 另一部分是抗拔桩达到极限承载力后作用在桩表面上的水平土压力降低引起的。

关 键 词: 界面; 抗拔桩; 承载特性; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Model experimental research on effects of properties of interface between piles and sand on bearing behavior of uplift piles in sand

LUO Yao-wu^{1,2}, HU Qi³, LING Dao-sheng¹, CHEN Zheng⁴, CHEN Yun-min¹

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Education Ministry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
4. East China Electric Power Design Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: In order to study the load-displacement curves, the ultimate uplift capacity and the residual uplift capacity of piles in sand, a testing program for different L/d model piles pullout tests is conducted. The model piles have three different roughness interfaces, and the shearing behavior of interfaces are tested. The load-displacement curves are similar for the piles with same interface when L/d is different. The uplift load of smooth pile reaches a steady value after the ultimate uplift capacity. The uplift load of rough pile becomes smaller after the ultimate uplift capacity; then it reaches the residual uplift capacity. When the piles are at failure, the lateral earth pressure coefficient K are affected by the roughness of pile; the rougher the pile is, the bigger the K is. The residual uplift capacity, expressed as a percentage of the ultimate uplift capacity is smaller for rougher piles; and the ratio is about the same for different L/d piles. The residual uplift capacity are smaller than the ultimate uplift capacity for rough piles; this is attribute to two reasons, one is the reduction of interface friction angle, the other is the reduction of lateral earth pressure.

Key words: interface; uplift pile; bearing behavior; model test

1 引 言

随着城市建设的大规模发展, 抗拔桩得到了广泛的应用, 已有大量学者就砂土地基中抗拔桩的极限承载力进行了模型试验研究。Alawneh 等^[1]就砂土地基中抗拔桩进行了模型试验, 关注了砂土密实

度、成桩方法、桩径、桩表面粗糙程度及桩端类型对抗拔桩极限承载力的影响。Dash 等^[2]研究了抗拔桩上作用的下压荷载对其净抗拔极限承载力的影响, 在试验过程中考虑了不同砂土密实度及模型桩不同长径比。谭国焕等^[3]研究了桩侧表面粗糙程度对模型桩极限承载力的影响。模型试验的研究过程

收稿日期: 2009-08-27

基金项目: 中国博士后科学基金 (No. 20080441232)。

第一作者简介: 罗耀武, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事桩基工程与深基坑工程的研究。E-mail: luoyaowu@163.com

通讯作者简介: 凌道盛, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程和计算力学的研究。E-mail: dsling@zju.edu.cn

中, 模型桩的选择是十分重要的, 如果采用光滑钢桩或铝桩, 抗拔桩极限承载力往往很小, 需对模型桩表面进行加工处理以增大其摩擦力, 桩侧表面的粗糙程度是影响抗拔桩极限承载力及承载特性的重要因素。

目前, 针对抗拔桩的试验多采用分级加载法, 试桩达极限承载力后便终止试验, 对于试桩在极限承载力之后的抗拔力很少见到相关报道。基桩施工完毕后, 若有地表大量堆载或土层开挖的情况, 基桩在土体的压缩或回弹作用下被动受荷, 桩-土之间相对位移往往很大, 超出桩-土界面抗剪强度充分发挥所需的位移^[4-6], 基桩在后期工程荷载的作用下, 抗拔力有可能进入残余承载力阶段。本文针对砂土地基中不同长径比 L/d 的抗拔桩进行了模型试验, 试验过程中采用了常速率上拔法, 模型桩采用 3 种不同界面, 结合界面剪切试验探讨了桩-土界面特性对抗拔桩荷载-位移曲线、极限承载力及残余承载力的影响。

2 试验方法及试验材料

2.1 砂土

本次试验采用细砂作为地基土体, 砂土颗粒级配曲线见图 1。砂土不均匀系数 $C_u=2.08$, 曲率系数 $C_c=0.82$, 最大、最小干密度分别为 1.77 、 1.43 g/cm^3 , 砂土颗粒相对密度为 2.65 。

试验过程中采用分层落雨法制样, 每层砂土高度为 15 cm , 制样时将砂子装入漏斗中, 漏斗底距砂面保持 50 cm 高度, 通过在砂土中埋入密度杯测得砂样干密度为 1.55 g/cm^3 , 相对密度 $D_r=42\%$, 属中密砂。采用直剪试验测得该密实度条件下砂土内摩擦角 $\varphi'=38^\circ$ 。

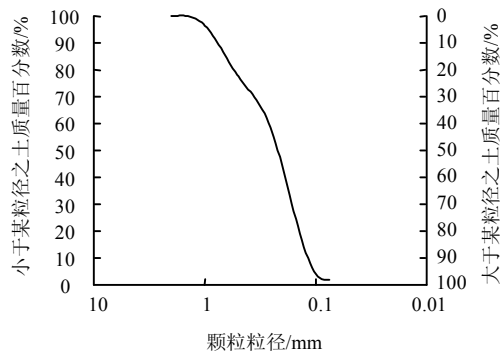


图 1 砂土颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of the sand

2.2 模型桩

本次试验共采用 3 种模型桩, 均用钢管制作,

钢管外径为 30 mm , 壁厚为 3 mm , 桩长为 1.7 m 。为研究桩-土界面特性对抗拔桩承载特性的影响, 对 3 根桩表面进行了不同的处理。第 1 种为保持原来的光滑钢桩表面; 第 2 种为采用压花的方法在模型桩表面压出纵向及横向沟槽; 第 3 种为在桩外表面粘贴最大砂粒粒径为 0.25 mm 的砂纸, 粘贴砂纸后模型桩外径为 31.5 mm 。3 种处理方法处理过后的桩表面粗糙程度依次增强。

2.3 模型槽

采用圆形钢桶作为试验模型槽, 钢桶内径为 1 m , 深度为 1.8 m , 壁厚 1 cm 。模型桩在成桩及加载过程中对砂土的影响范围为 $(3\sim 8)d$ ^[7], d 为桩直径。本次试验桩端下卧砂层厚度为 30 cm ($10d$), 桩外壁距模型槽内壁为 $16d$, 已超出了桩对砂土的影响范围。

2.4 模型桩成桩及试验方法

模型桩采用预先埋入法成桩, 即先将桩固定在模型槽中一定深度, 保持桩竖直向下, 再用漏斗分层落砂至预定高度, 抗拔桩极限承载力试验采用常速率上拔法。模型制备完成后, 采用应变式无侧限压力仪对模型桩施加 0.6 mm/min 的上拔速率, 采用位移百分表及量力环进行模型桩位移及上拔力的量测, 达极限承载力后继续上拔, 直到上拔位移累计达 11 mm 为止, 然后卸荷为 0 , 并再次进行上拔试验以测定模型桩残余上拔力。本次试验对每根模型桩分别进行了长径比 L/d 为 10 、 20 和 30 三组试验, 总共进行了 9 组试验。试验装置见图 2。

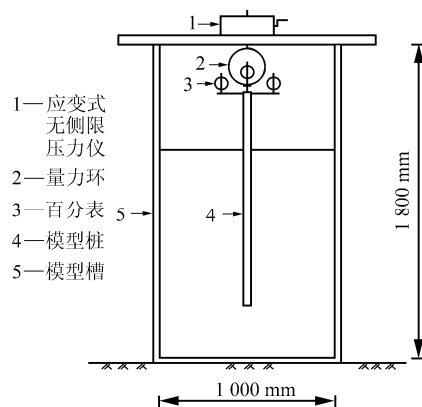


图 2 试验装置图

Fig.2 Experimental apparatus of the model test

3 试验结果

3.1 荷载-位移曲线

试验结果表明, 同一根模型桩不同长径比时的

荷载-位移曲线具有类似的规律。图 3 为 $L/d=20$ 时光滑界面钢桩两次上拔对应的荷载-位移曲线,由图可以看出,两次上拔的荷载-位移曲线具有相似的特性。上拔力较小时,光滑界面钢桩荷载-位移曲线呈线性。随着上拔力增加,荷载-位移曲线逐渐变为非

线性直至达到极限。其后,模型桩上拔力随上拔位移的增加保持不变,呈理想塑性状态。与第 1 次上拔相比,第 2 次上拔的极限上拔力有所降低,但降低幅度不大。

表 1 抗拔桩极限承载力及临界位移

Table 1 Ultimate uplift capacity and ultimate displacement of piles

L/d	上拔次数	光滑界面		压花界面		砂纸界面	
		极限承载力/N	临界位移/mm	极限承载力/N	临界位移/mm	极限承载力/N	临界位移/mm
10	1 次	15.06	1.69	33.12	1.87	39.14	2.69
	2 次	12.65	1.50	9.03	2.10	9.03	2.10
20	1 次	73.77	1.62	124.96	1.88	153.56	2.55
	2 次	64.74	1.47	37.64	2.30	34.63	2.60
30	1 次	167.11	1.71	236.36	1.81	307.12	2.66
	2 次	141.52	1.57	79.79	2.01	76.78	2.12

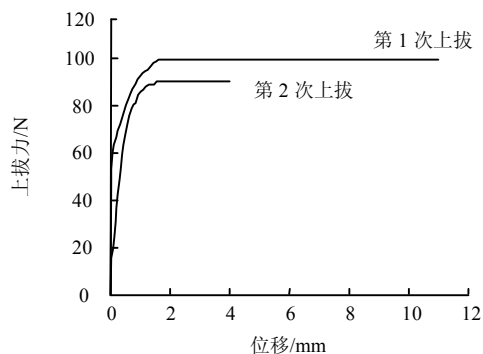


图 3 光滑钢桩荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves of smooth pile

图 4 为 $L/d=20$ 时压花界面钢桩两次上拔的荷载-位移曲线。由图可以看出,第 1 次上拔时,随着上拔位移的增加,模型桩上拔力逐步增大直到极限值,随后上拔力逐步变小,直至相对稳定的残余上拔力,荷载-位移曲线呈明显软化特性,残余上拔力较极限上拔力有明显降低。第 2 次上拔时的荷载-位移曲线与第 1 次相比有明显差异,与光滑界面钢桩相近,无软化现象。第 2 次上拔的极限上拔力和第一次上拔的残余上拔力接近。

图 5 为 $L/d=20$ 时砂纸界面钢桩两次上拔的荷载-位移曲线。由图可以看出,砂纸界面钢桩荷载位移曲线呈现与压花界面钢桩类似的性状,第 1 次上拔有明显软化现象,第 2 次上拔的极限上拔力和第 1 次上拔的残余上拔力接近。

由于模型钢桩自重相对上拔力较大,定义模型桩的抗拔极限承载力和抗拔残余承载力为极限上拔力和残余上拔力减去桩身自重。表 1 给出了 3 种模型桩的 9 组试验成果统计表。对比 3 种不同界面抗拔桩第 1 次上拔时的极限承载力可看出,界面越粗

糙,抗拔桩极限承载力越大。对比 3 种不同界面抗拔桩第 1 次上拔时达极限承载力时的位移(简称临界位移)可看出,光滑界面、压花界面、砂纸界面抗拔桩临界位移分别为 1.6~1.7、1.8~1.9、2.5~2.7 mm。由此可看出,界面越粗糙,抗拔桩临界位移越大。

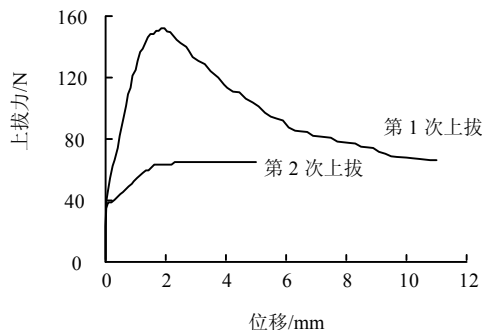


图 4 压花钢桩荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves of embossed pile

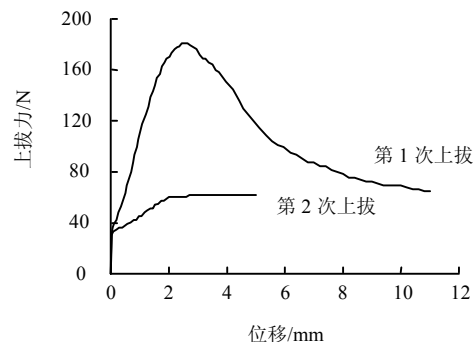


图 5 砂纸界面钢桩荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of pile with sandpaper

3.2 界面剪切试验

为了确定桩-土界面摩擦角, 分析桩-土界面剪切特性, 采用常规直剪试验仪进行了光滑钢板和粘贴砂纸钢板与砂土之间的界面剪切试验。加工 2 块与剪切盒相同大小的圆形钢板, 第 1 块保持光滑表面, 第 2 块在钢板表面粘贴砂纸。钢板放在直剪仪的下盒中, 表面与下盒表面平齐, 保证其表面为剪切面, 然后放置上部剪切盒, 再倒入砂土, 将砂土振实至指定密度 (1.55 g/cm^3), 以 0.8 mm/min 的剪切速率进行试验。法向应力为 50、100 kPa 时光滑钢板和砂土之间的剪应力-位移曲线见图 6。由图可以看出, 界面极限抗剪强度完全发挥所需的位移为 1.2 mm 左右, 剪应力达极限后便不再变化。光滑钢板与砂土之间摩擦角为 31° , 小于砂土内摩擦角。由此可见, 光滑钢板与砂土间剪切时, 剪切破坏带应位于界面上而非砂土内部。

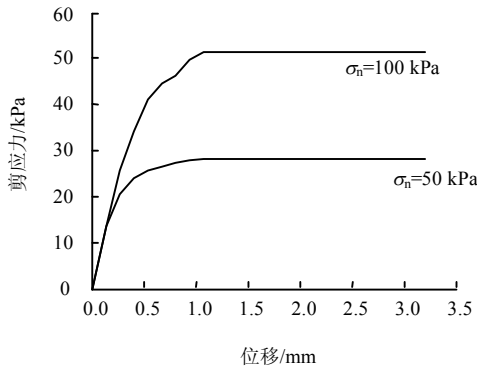


图 6 光滑界面剪应力-位移曲线
Fig.6 Shear stress-displacement curves of smooth interface

法向应力为 50、100 kPa 时粘贴砂纸钢板和砂土之间的剪应力-位移曲线如图 7 所示。

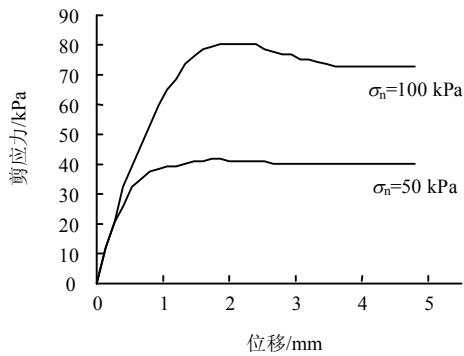


图 7 砂纸界面剪应力-位移曲线
Fig.7 Shear stress-displacement curves of sandpaper interface

砂纸界面极限抗剪强度完全发挥所需的位移为

1.8 mm 左右, 剪应力达到极限后曲线有软化性状。砂纸界面与砂土之间峰值摩擦角 $\delta_f^p = 38^\circ$, 残余摩擦角 $\delta_f^R = 36^\circ$ 。可以看出, 峰值摩擦角和砂土内摩擦角一致, 粘贴砂纸钢板与砂土间剪切时, 剪切破坏带应位于砂土内部。

3.3 抗拔桩极限承载力

抗拔桩的桩侧极限摩阻力 τ_f 可由下式计算:

$$\tau_f = \sigma'_{rf} \tan \delta_f = K \sigma'_v \tan \delta_f \quad (1)$$

式中: σ'_{rf} 为抗拔桩破坏时的水平向有效应力; δ_f 为桩-土界面摩擦角; K 为抗拔桩达极限承载力时的静止土压力系数; σ'_v 为竖向有效应力。 K 和 δ_f 是决定抗拔桩极限承载力的最主要因素。

根据 Lehane 等^[8]及 Jardine 等^[9]的研究, 砂土地基中抗拔桩达极限承载力时作用在桩上的水平有效应力 σ'_{rf} 由两部分组成: 一部分是静止的水平应力 (抗拔桩成桩后, 加载之前); 另一部分是抗拔桩加载过程中由于砂土膨胀而导致的水平应力, 即

$$\sigma'_{rf} = \sigma'_{rc} + \sigma'_{rd} \quad (2)$$

式中: σ'_{rc} 为抗拔桩成桩后, 加载之前的水平应力; σ'_{rd} 为抗拔桩加载过程中桩周砂土膨胀对水平应力的贡献。式 (2) 可以写为

$$\sigma'_{rf} = \sigma'_v \left(K_m + \frac{\sigma'_{rd}}{\sigma'_v} \right) \quad (3)$$

式中: K_m 为不考虑砂土膨胀影响的静止土压力系数, 式 (3) 可改写为

$$\sigma'_{rf} = K \sigma'_v \quad (4)$$

$$K = \left(K_m + \frac{\sigma'_{rd}}{\sigma'_v} \right) \quad (5)$$

式中: K 为包含了砂土膨胀影响的静止土压力系数。

对于圆形截面桩, 抗拔桩达极限承载力时桩侧平均侧摩阻力 f_a 及静止土压力系数 K 可通过下式计算:

$$f_a = \frac{Q_0}{A_s} \quad (6)$$

$$K = \frac{2f_a}{L\gamma' \tan \delta_f} \quad (7)$$

式中: Q_0 为抗拔桩极限承载力; A_s 为桩侧总表面积; L 为桩长; γ' 为土体有效重度。根据式 (6)、(7) 计算光滑界面及砂纸界面抗拔桩达极限承载力时的静止土压力系数如表 2 所示。根据 Jaky 提出的静止土压力系数公式 $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ 算得砂土 $K_0 = 0.38$ 。对比

表2中试验结果可以看出,光滑界面抗拔桩达极限承载力时的 $K=0.42$,稍大于 K_0 ;而砂纸界面抗拔桩达极限承载力时的 $K=0.65$,远大于 K_0 。由此可见, K 值受桩-土界面粗糙程度的影响,界面越粗糙, K 值越大。这说明界面越粗糙,抗拔桩上拔时砂土膨胀越明显,导致抗拔桩破坏时作用在其表面上的水平土压力越大。

由以上分析可见,有两个因素导致砂土地基中粗糙界面抗拔桩极限承载力大于光滑界面桩。一个原因是粗糙界面抗拔桩桩土之间摩擦系数大于光滑界面桩;另一个原因是界面越粗糙,抗拔桩达极限承载力时的静止土压力系数 K 越大。

表2 静止土压力系数			
Table 2 Coefficient of earth pressure at rest			
L/d	K		
	光滑界面 (极限承载力)	砂纸界面 (极限承载力)	砂纸界面 (残余承载力)
10	0.37	0.69	0.17
20	0.44	0.67	0.16
30	0.45	0.60	0.16
平均值	0.42	0.65	0.16

3.4 抗拔桩残余承载力

图8为3种界面抗拔桩残余承载力与极限承载力的比值 R 随 L/d 的变化图。由图可以看出,光滑界面、压花界面、砂纸界面抗拔桩残余承载力分别为极限承载力的85%、30%、23%左右。界面越粗糙,残余承载力占极限承载力的比值越小,该比值受 L/d 的影响较小。

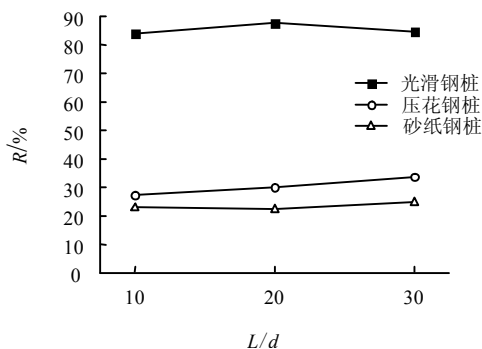


图8 R 随 L/d 变化图

Fig.8 R vary with L/d

粘贴砂纸钢板与砂土间残余摩擦角 $\delta_f^R=36^\circ$,根据式(6)、(7)算得砂纸界面抗拔桩达残余承载力时的静止土压力系数 K 如表2所示。由表可以看出,抗拔桩上拔力由极限承载力向残余承载力发展的过程中 K 值从0.65减小至0.16。可见,对于粗糙界面

抗拔桩,残余承载力与极限承载力的差别一部分是由于桩-土界面摩擦角的降低引起的;另一部分是抗拔桩达到极限承载力后,作用在其表面上的水平土压力降低引起的。

4 结 论

针对不同界面抗拔桩进行了模型试验,结合界面剪切试验分析了界面特性对抗拔桩承载特性的影响,得到以下几点结论:

(1) 抗拔桩长径比 L/d 不同时,每种界面抗拔桩荷载-位移曲线类似。光滑界面抗拔桩上拔力达极限承载力后保持不变,压花界面和砂纸界面抗拔桩上拔力达极限承载力后降低,直至达到残余承载力。抗拔桩达极限承载力的位移随界面粗糙程度的增加而增大。

(2) 抗拔桩达极限承载力时的静止土压力系数 K 受桩-土界面粗糙程度的影响,界面越粗糙, K 值越大。这说明界面越粗糙,抗拔桩上拔时砂土膨胀越明显,导致作用在其表面上的水平土压力越大。

(3) 界面越粗糙,抗拔桩残余承载力与极限承载力的比值越小,该比值受 L/d 的影响较小。

(4) 对于粗糙界面抗拔桩,残余承载力与极限承载力的差别一部分是由于桩-土界面摩擦角的降低引起的;另一部分是抗拔桩达到极限承载力后,作用在其表面上的水平土压力降低引起的。

参 考 文 献

- [1] ALAWNEH A S, MALKAWI A I H, AL-DEEKY, H. Tension tests on smooth and rough model piles in dry sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,1999,36(4): 746—753.
 - [2] DASH B K, Pise P J. Effect of compressive load on uplift capacity of model piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2003,129(11): 987 — 992.
 - [3] 谭国焕, 张佑启, 杨敏. 松砂土中桩侧表面粗糙程度对桩承载力的影响[J]. *岩土工程学报*, 1992,14(2):50—54.
 - [4] LEE C J, Ng C W W. Development of downdrag on piles and pile groups in consolidation soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(9): 905—914.
 - [5] 胡琦, 凌道盛, 陈云敏, 等. 深基坑开挖对坑内基桩受力特性的影响分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(7):1965—1970.
- HU Qi, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Study on loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. *Rock and Soil*

Mechanics, 2008, 29(7):1965—1970.

下转第 732 页

- [6] 夏力农, 雷鸣, 聂重军. 桩顶荷载对负摩阻力性状影响的现场试验[J]. **岩土力学**, 2009, 30(3): 664—668.
XIA Li-nong, LEI Ming, NIE Chong-jun. Field test of influences of load at pile top on negative skin friction behaviors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 664—668.
- [7] ROBINSKY E I, MORRISON C F. Sand displacement and compaction around model friction piles[J]. **Canadian**

Geotechnical Journal, 1964, 1(2): 81—93.

- [8] LEHANE B M, JARDINE R J, BOND A J, et al. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(1): 19—35.
- [9] JARDINE R J, CHOW F C. New design methods for offshore piles[M]. London: MTD Publication 96/103, Center for Petroleum and Marine Technology (CPMT), 1996.