

考虑时间效应的群桩负摩阻力模型试验研究

孔纲强¹, 杨庆^{1,2}, 郑鹏一¹, 栾茂田^{1,2}

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 桩基负摩阻力是桩基础设计中必须考虑的重要问题之一, 但是针对考虑土体固结时间效应的群桩负摩阻力研究却相对较少。进行了在地面堆载固结条件下, 黏性土层中 3×3 群桩负摩阻力性状的室内模型试验研究, 测得了不同桩间距 ($3d$, $4d$, $6d$) 条件下各位置桩 (角桩、边桩、中心桩) 的桩侧负摩阻力、桩端阻力以及桩周土体分层沉降随固结时间的变化情况, 分析了桩身下拽力和中性点位置随时间的变化规律; 并进行了同等条件下单桩及 2×2 群桩 ($4d$) 试验作为比较分析。试验结果表明, 群桩中桩侧负摩阻力引起的下拽力和中性点位置都存在明显的时间效应和群桩效应, 其数值与基桩数、基桩的布置位置及桩间距等因素有关; 在本文试验情况下, 当桩-土相对位移达到 2 mm 时, 桩侧负摩阻力将达到其最大值的 $80\% \sim 90\%$ 。

关键词: 群桩; 负摩阻力; 下拽力; 中性点; 时间效应; 群桩效应; 模型试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1913-07

作者简介: 孔纲强(1982-), 男, 浙江磐安人, 博士, 主要从事桩基负摩阻力方面研究。E-mail: gqkong1@163.com。

Model tests on negative skin friction for pile groups considering time effect

KONG Gang-qiang¹, YANG Qing^{1,2}, ZHENG Peng-yi¹, LUAN Mao-tian^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Negative skin friction is one of important problems in design of pile foundation, but the negative skin friction of pile groups considering time effect is less studied. The negative skin friction of 3×3 pile groups ($3d$, $4d$, $6d$) on the viscous soil layer under surface load consolidation conditions is studied by model tests. The negative skin friction of pile side, tip resistance of pile and variation of settlement of each soil layer with consolidated time are measured. The position of neutral point and dragload are analyzed. For comparative analysis, a single pile and 2×2 pile groups ($4d$) are tested under the same conditions. The results show that the dragload and position of neutral point caused by the negative skin friction of pile side exhibit significant time effect and pile group effect for both the single pile and pile groups, and they are affected by the number of piles, the position of piles in group and the spacing of piles. It is also shown that the negative skin friction of pile side reaches $80\% \sim 90\%$ of the maximum one when the relative displacement of pile-soil reaches 2 mm under the present model test conditions.

Key words: pile group; negative skin friction; dragload; neutral point; time effect; pile group effect; model test

0 引言

软土在堆载固结、地下水位下降等情况下, 桩周土可能产生大于桩体的竖向位移, 产生桩侧负摩阻力从而导致桩身下拽力^[1]。由于软土的固结需要一个过程, 因而桩侧负摩阻力的产生发展具有时间效应。

近年来, 国内外开展了一系列关于桩基础负摩阻力性状的模型试验研究, 并取得了一定的成果: Sawaguchi 等利用模型试验对斜桩负摩阻力性状进行了初步探讨^[2]。Shibata 等利用室内模型试验对地面堆载条件下黏性土中竖直桩、斜桩负摩阻力性状进行了研究, 讨论了群桩布置形式和地面堆载等级等因素对负摩阻力群桩效应的影响, 并分析了沥青涂层对减少

桩侧负摩阻力值的作用^[3-4]。Toma 等利用室内模型试验对桩周土固结条件下黏性土中竖直单桩负摩阻力性状进行了研究^[5]。吴一伟等利用室内模型试验研究了砂土液化后因固结沉陷引起的桩侧负摩阻力与地面沉陷之间的关系^[6]。张晓健等利用室内模型试验对砂土中的 PCC 单桩进行试验研究, 得到了 PCC 桩的中性点位置以及桩身应变变化关系^[7]。谢依航等利用室内模型试验研究了在控制长期温度效应条件下压密沉陷对竖直桩基负摩阻力的影响^[8]。陈仁朋等对桩-土界面的荷载传递双曲线模型进行了改进, 考虑了地基土

的固结, 桩侧土初始剪切刚度随时间增长及桩-土界面的加载、卸载循环剪切特性等对桩侧负摩阻力的影响^[9]。夏力农等通过现场试验和数值模拟研究了不同桩顶荷载作用下中性点位置、桩身下拽力、桩周土沉降变化以及桩的负摩阻力特性随时间的变化规律^[10]。肖俊华等对抛石过程中高桩码头接岸结构中的桩基础负摩阻力进行了现场监测, 并取得了宝贵的第一手资料^[11]。黄雪峰等对自重湿陷性黄土中的挖孔灌注桩进行了现场载荷-浸水试验, 测得了无摩擦桩、空底桩、摩擦端承桩及悬吊桩的桩侧负摩阻力和中性点位置^[12]。杨庆等通过对粉土中混凝土单桩竖向静载荷的模型试验, 分析了桩顶荷载、地面堆载共同作用下桩端阻力及桩周土沉降情况, 进而研究了桩周土含水率变化对中性点位置及桩身下拽力的变化规律^[13]。王兰民等对强震引发黄土震陷时桩基负摩阻力的基本特性进行了现场试验研究, 并取得了宝贵的第一手现场数据资料^[14]。

综上所述, 考虑时间效应的群桩负摩阻力特性研究相对较少, 故本文进行了在地面堆载固结条件下, 黏性土层中 3×3 群桩负摩阻力性状的室内模型试验研究, 并进行了同等条件下单桩及 2×2 群桩 (4d) 试验作为比较分析。试验研究了不同桩间距 (3d、4d、6d) 条件下各位置桩 (角桩、边桩、中心桩) 桩侧负摩阻力、桩端阻力以及桩周土体分层沉降随固结时间的变化情况, 分析了桩身下拽力及中性点位置随时间的变化规律。

1 模型试验装置及试样制备

桩基模型箱净空尺寸 (长×宽×高) 为 1500 mm×700 mm×1000 mm; 模型箱壁为 10 mm 厚的钢板, 可较好地约束侧向变形; 试验时箱壁涂一层润滑油以减少试验土与箱壁摩擦所造成的影响, 模型箱壁距离模型桩的最小间距在 3d 以上, 边界效应较小; 箱长边侧面底部于中轴线对称分布孔径为 10 mm、孔中心距槽底 40 mm、孔间距为 175 mm 的排水孔 (一侧 6 个共 12 个), 模型试验布置如图 1、2 所示。

模型桩采用桩长 L 为 1000 mm, 外径 d 为 40 mm, 壁厚 h 为 3 mm 的有机玻璃管 (桩端封口), 桩的静弹性模量 E_p 取为 2.3×10^3 MPa。先将有机玻璃管沿纵轴线方向剖成两半, 对称的贴上 18 片应变片、连线, 贴片位置见图 2 所示, 并涂环氧树脂保护; 然后将桩管重新黏合, 并做防渗处理; 应变片及导线布置在桩体内侧, 保护应变片的同时, 避免应变片引出线对桩周土的扰动; 在桩外侧黏细砂 (粒径在 0~2 mm) 以增

加桩侧粗糙度, 实际平均桩径约为 41 mm; 根据 SSI 试验^[15]测得桩-黏土间的摩擦系数 μ_1 约为 0.59, 桩-粉土间的摩擦系数 μ_2 约为 0.54, 可压缩黏性土层顶面总堆载量 q 约为 11 kPa。根据不同试验工况, 在单桩、2×2 群桩和 3×3 群桩上分别固定一尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm, 350 mm×350 mm×10 mm 和 600 mm×600 mm×10 mm 的有机玻璃板作为桩承台。



图 1 模型试验布置实物图

Fig. 1 Model test apparatus

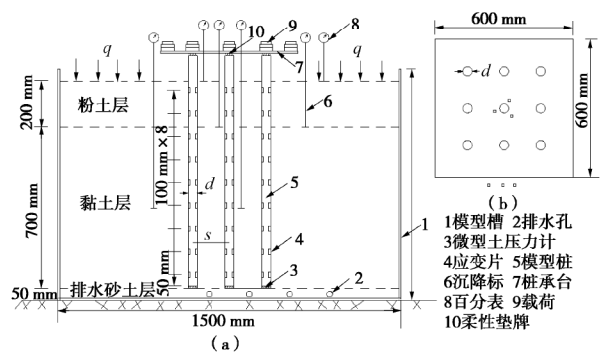


图 2 模型试验布置示意图

Fig. 2 Layout of model tests

试验桩周土采用饱和或近似饱和重塑红黏土, 用水浸泡 3 d 使其饱和或近似饱和后, 将重塑土均匀填入模型试验箱中。利用回填粉土和均匀布置的砝码模拟地面堆载, 填土采用分层人工踏实法, 并确保各组试验有相近的密实度。另外利用粒径在 2~10 mm 的清洗砂作为桩基础的排水层。试验用土土性指标参数见表 1。

2 模型试验过程描述

首先在模型箱内填埋 50 mm 厚的清洗砂 (粒径 2~10 mm) 作为排水层, 在排水孔处贴细纱网以避免砂土流出; 接着在砂土层上放置一定位板以确保桩垂直定位, 将桩内侧贴有应变片的模型桩安放在设定位置上, 桩端埋置箱式微型土压力盒, 桩侧摩阻力利用

表 1 试验用土土性指标参数

Table 1 Parameters of saturated clay and silt for tests

名称	黏聚 系数 c_{cu}/kPa	内摩 擦角 $\varphi_{cu}/(^{\circ})$	压缩 系数 α_c/MPa^{-1}	压缩 模量 E_c/MPa	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙 比 e	含水 率 $w_0/\%$	饱和 度 $S_r/\%$	塑限 $w_P/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性 指数 I_P	液性 指数 I_L	最大干 密度 ρ_{dmax} $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含 水率 $w/\%$	比重 G_s
黏土	7.00	19.10	0.65	2.01	17.40	1.34	48.60	99.4	20.53	54.76	34.23	0.82	1.62	14.06	2.74
粉土	16.16	33.90	0.93	2.13	13.90	—	13.00	—	13.40	20.59	7.19	-0.06	1.91	13.47	—

DH3816 静态应变仪测得应变片所在测点的应变, 根据换算得到桩身轴力; 然后将重塑饱和红黏土均匀地填埋在试验箱中, 并在群桩内外黏土层中部 ($z = -550$ mm)、黏土层与粉土层交界处 ($z = -200$ mm)、粉土层表面处 ($z = 0$ mm) 土层设置分层沉降标 (分层沉降标采用直径 2 mm 的钢丝, 钢丝的底端焊接 40 mm×50 mm 的薄钢片, 顶端与精度为 0.01 mm 的百分表相连), 群桩内沉降标布置在中心桩和角桩的连线上、且距离中心桩侧面 40 mm 处; 群桩外沉降标布置在模型槽长边方向、中轴线上距离承台外侧 100 mm 处, 平面布置图如图 2 (b) 所示; 最后安放桩承台并在桩承台与桩顶之间设置柔性垫片, 使各桩顶尽量均匀受力; 在桩顶承台的两对角处布置两个百分表, 并取两百分表读数的平均值作为桩顶承台沉降值。

埋设完成后, 静置 12 h 后开始利用砝码在桩顶承台上进行分级加载, 参考 JGJ94—94 建筑桩基技术规范^[16]快速维持荷载法, 考虑相对稳定, 每隔 15 min 加一级荷载, 测得桩顶承台加载与桩顶沉降曲线以及桩顶承台加载与桩端阻力值关系曲线; 桩顶加载完成后, 在黏土层表面铺设一层土工布并堆载 200 mm 厚的粉土和均匀布置砝码压块, 使堆载强度达到 11 kPa 左右, 在黏土层固结沉降过程中测定桩身下拽力, 桩端阻力及各土层沉降随固结时间的变化情况; 当各测值趋于稳定时, 结束试验并对桩顶承台荷载进行分级卸载。

3 模型试验结果及分析

进行了单桩、2×2 群桩 (4d)、3×3 群桩 (3d)、3×3 群桩 (4d)、3×3 群桩 (6d) 五种工况的试验。

3.1 桩顶承台加卸载与桩顶承台沉降的 $Q-s_c$ 曲线

由图 3 可以知道, 由于桩顶加载量较小, 桩体基本处于弹性阶段而远未达到破坏阶段, 因而 $Q-s_c$ 加载曲线都近似成线性关系。在同等单桩荷载等级下, 3×3 群桩 (6d) 的桩顶承台沉降量是 3×3 群桩 (4d) 的 81.3%, 是 3×3 群桩 (3d) 的 51.7%; 说明由于桩侧土体对桩体沉降的约束作用, 群桩中同等桩数情况下, 桩顶承台沉降量随着桩间距 (在 6d 范围内) 的增大而减小。3×3 群桩 (4d) 的桩顶承台沉降量是 2×2 群桩 (4d) 的 1.15; 说明相同桩间距在单位荷载作用下, 桩顶承台沉降量随着桩数的增大而增大, 这与实际情况相符。另外, 由于受桩身自重、单桩桩顶

荷载值较小等因素的影响, 桩顶加载时单桩桩顶沉降量相对较小。

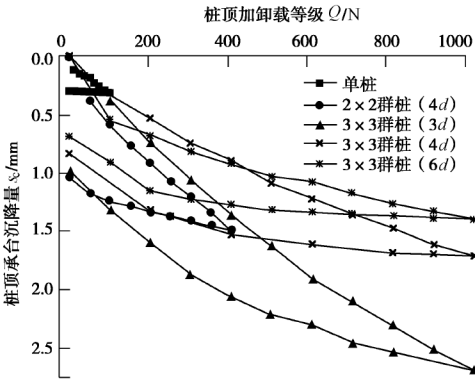


图 3 桩顶加卸载与桩顶承台沉降关系曲线

Fig. 3 Relationship between loading-unloading at pile top and settlement of pile cap

3.2 桩顶承台加卸载与桩端阻力值的 $Q-F_d$ 曲线

由图 4 可知, 曲线上半段是加载曲线, 下半段是卸载曲线, 根据桩端土压力盒测定所得, 当单桩、2×2 群桩和 3×3 群桩桩顶承台加载量分别达到最大值 102 N、408 N 和 1020 N 时, 桩端阻力值均达到最大值; 在同等单桩荷载等级下, 桩顶承台加卸载与桩端阻力值 $Q-F_d$ 曲线成线性关系且各加载曲线基本一致; 卸载过程中, 群桩的回弹率较单桩略高一些, 这是由于群桩中各基桩间的相互作用削弱了桩周土对基桩的限制作用。3×3 群桩 (3d)、3×3 群桩 (6d) 的各位置桩 $Q-F_d$ 曲线与 3×3 群桩 (4d) 基本一致, 说明桩间距 (在 6d 范围内) 对各位置桩的 $Q-F_d$ 曲线影响不大。

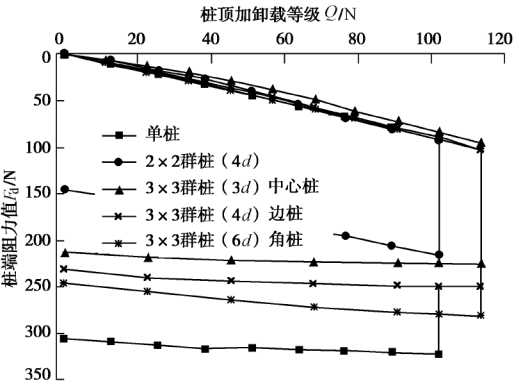


图 4 桩顶加卸载与桩端阻力关系曲线

Fig. 4 Relationship between loading-unloading at pile top and tip resistance of pile

3.3 堆载固结过程中桩端阻力值时间效应的 $F_d - T$ 曲线

由图 5 可知, 单桩、 2×2 群桩和 3×3 群桩的桩端阻力均随着地面堆载固结时间的增加而增大并逐渐趋于稳定; 同一时刻, 3×3 群桩中各位置桩的桩端阻力值: 角桩大于边桩、边桩大于中心桩, 单桩的桩端阻力值大于 2×2 群桩的桩端阻力值、而 2×2 群桩的桩端阻力值大于 3×3 群桩的桩端阻力值; 说明同一时刻, 随着桩数的增加单根桩桩端阻力值反而减少, 这是由于群桩中相邻桩间相互作用限制桩周土的沉降造成的结果。

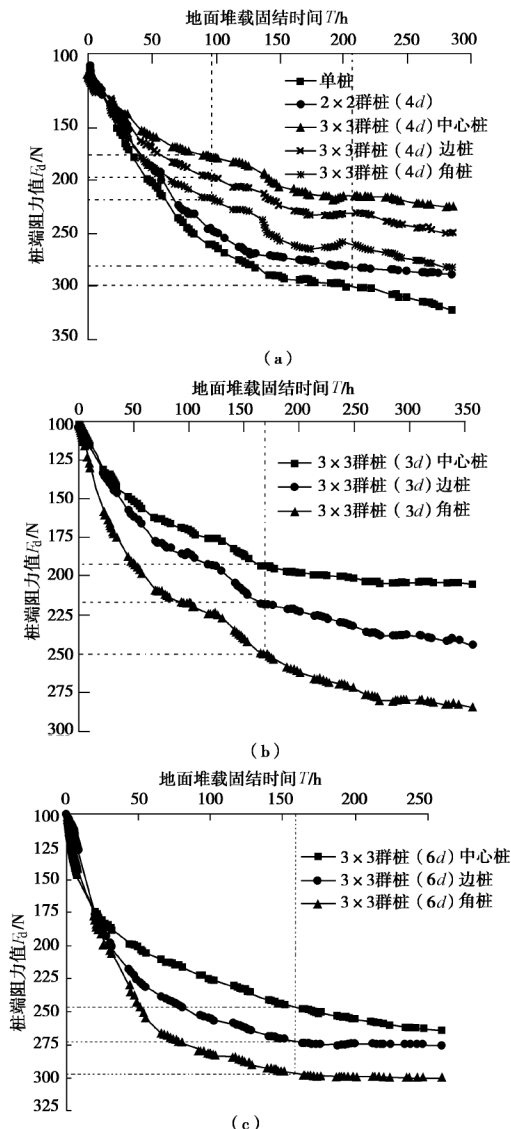


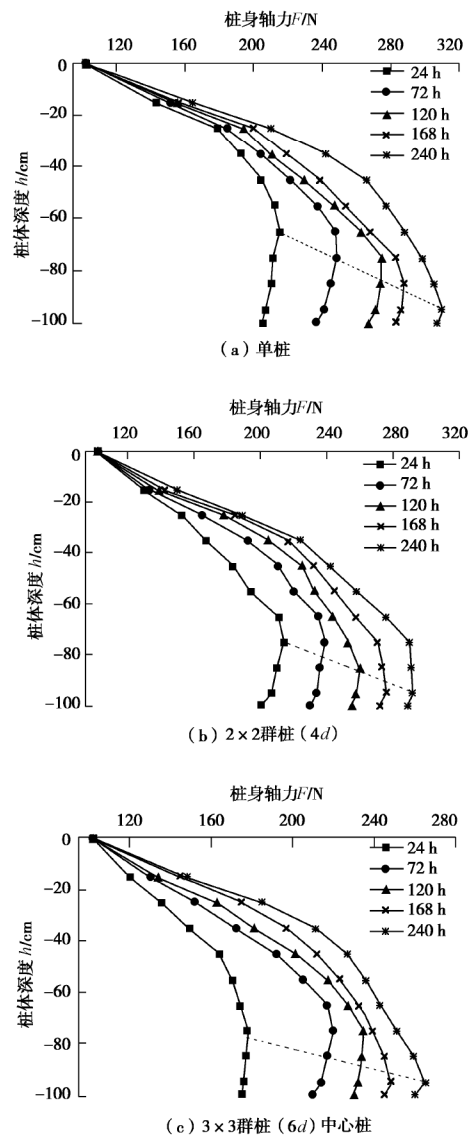
图 5 桩端阻力值随固结时间的变化曲线

Fig. 5 Relationship between tip resistance of pile and consolidation time

3.4 桩身轴力随桩体深度变化的 $F - h$ 曲线

由图 6 可知, 地面堆载固结过程中, 单桩、 2×2 群桩 (4d) 和 3×3 群桩 (6d) 的桩身轴力随着固结时

间的增长, 而逐步发展, 且前期发展速度较后期快; 桩身轴力沿桩体深度方向变化, 且中性点位置 (桩身轴力最大值处) 也随着固结时间的增长而逐渐向下移动; 地面堆载固结 240 h 后, 基本位于 0.9 倍可压缩黏土层厚度处; 中性点以上, 桩体上部轴力增长速率较下部大, 这是由于土层上部桩 - 土相对位移大于下部, 导致上部桩侧负摩阻力值大于下部, 这与文献[3]所得结果一致。由图 6 (f) 可知, 在固结时间为 240 h 时刻, 3×3 群桩 (6d) 中各位置桩的桩身轴力比较: 角桩大于边桩, 中心桩最小。由图 7 可知, 3×3 群桩中各位置桩桩身最大轴力随桩间距的变化规律, 角桩、边桩和中心桩的变化规律一致, 都随着桩间距的增大而增大。由表 2 可知, 3×3 群桩 (3d)、 3×3 群桩 (4d) 的桩身最大轴力和中性点位置变化规律与 3×3 群桩 (6d) 的规律一致, 但是对应位置桩桩间距大时, 桩身最大轴力相对大些。



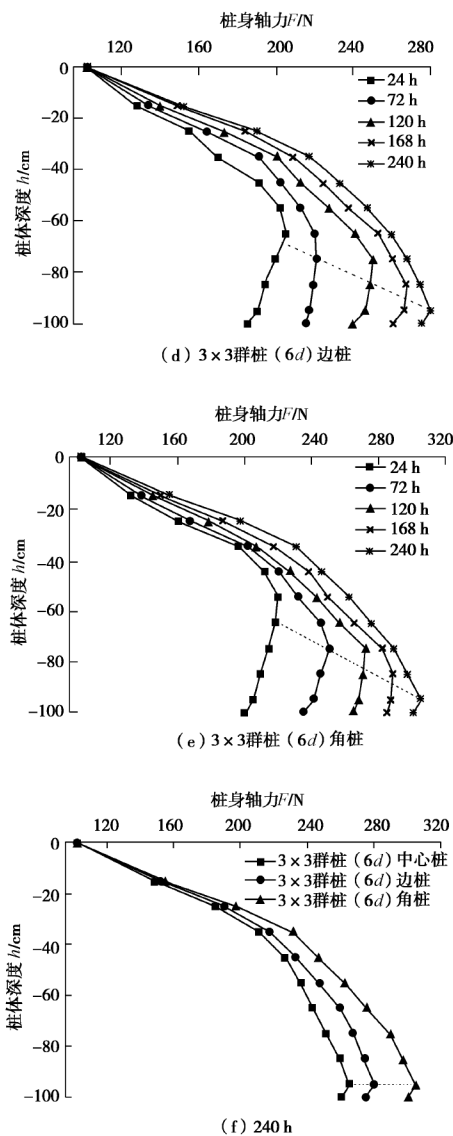


图 6 桩身轴力随桩体深度变化曲线

Fig. 6 Relationship between axial force of pile shaft and depth of pile

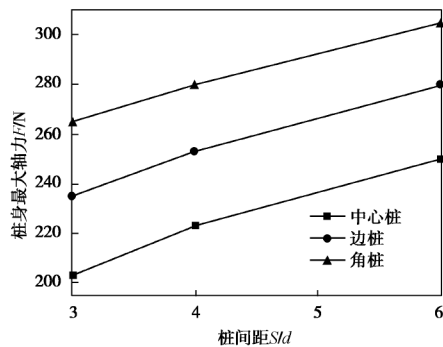


图 7 桩身最大轴力与桩间距关系曲线

Fig. 7 Relationship between axial force of pile shaft and pile spacing

3.5 堆载固结过程中各土层沉降随固结时间变化的 $s_i - T$ 曲线

由图 8 可知, 地面堆载固结条件下, 土体各层沉降随固结时间的增加而增大, 并逐渐趋于稳定。同一工况不同深度范围内, 土体沉降分层累加, 土表层的总沉降大于-20 cm 层的大于-55 cm 层的总沉降。桩体的存在对土体沉降起到限制作用, 受其影响在同一时刻群桩内土体沉降较群桩外小, 3×3 群桩内沉降较 2×2 群桩内沉降小, 3×3 群桩 (6d) 的群桩内沉降较 3×3 群桩 (3d) 和 3×3 群桩 (4d) 的群桩内沉降小。

由图 9 可知, 可压缩黏土中间层 (-55 cm 层) 和黏土顶面与粉土堆载连接层 (-20 cm 层) 的群桩内外沉降比 R_f 均随着桩间距的增大而增大, 且 -20 cm 层的沉降比大于 -55 cm 层的沉降比。当桩间距较小 (3d、4d) 时, 群桩内外沉降比变化不大且保持在 0.5 左右; 当桩间距较大 (如达到 6d) 时, 群桩内外沉降比达到 0.95 左右, 即当桩间距超过 6d 时, 群桩内外沉降比达到 1.0、群桩效应将近似弱化为零, 这与 JGJ94—2008 规范^[6]规定的相应条款相一致。

在图 8 中以可压缩黏土中间层土体位移 2 mm (即桩-土相对位移约等于 2 mm) 为参照, 可得各试验工况下对应的固结时间, 结合图 5 可知, 相应工况下对应固结时间下的桩端阻力值可知, 此时由桩身下拽力产生的桩端阻力数值近似达到其最大值的 80%~90%。

4 结 论

(1) 基桩桩侧负摩阻力的发挥都存在明显的时间效应; 随着土体固结沉降的发展, 桩侧负摩阻力值得到逐步的发挥并趋于稳定; 在本文试验情况下, 当桩-土相对位移达到 2 mm 时, 桩侧负摩阻力值产生的桩身下拽力达到其最大值的 80%~90%; 当固结时间达到 240 h 时, 中性点位置基本稳定在 $0.9H$ (H 为可压缩土层厚度) 附近。

(2) 桩身最大下拽力受基桩数目、桩间距等因素的影响, 桩身最大下拽力随桩间距 (6d 范围内) 的增大而近似成线性增加; 群桩内各位置桩的桩身下拽力和中性点位置各不相同, 其中角桩大于边桩大于中心桩。

(3) 群桩负摩阻力也存在明显的群桩效应, 3×3 群桩中单根桩的桩身下拽力小于 2×2 群桩和单桩情况; 群桩效应受桩间距大小的影响显著, 桩间距在 (3d、4d) 时, 群桩效应明显, 当桩间距大于 6d 时, 群桩效应近似为零。

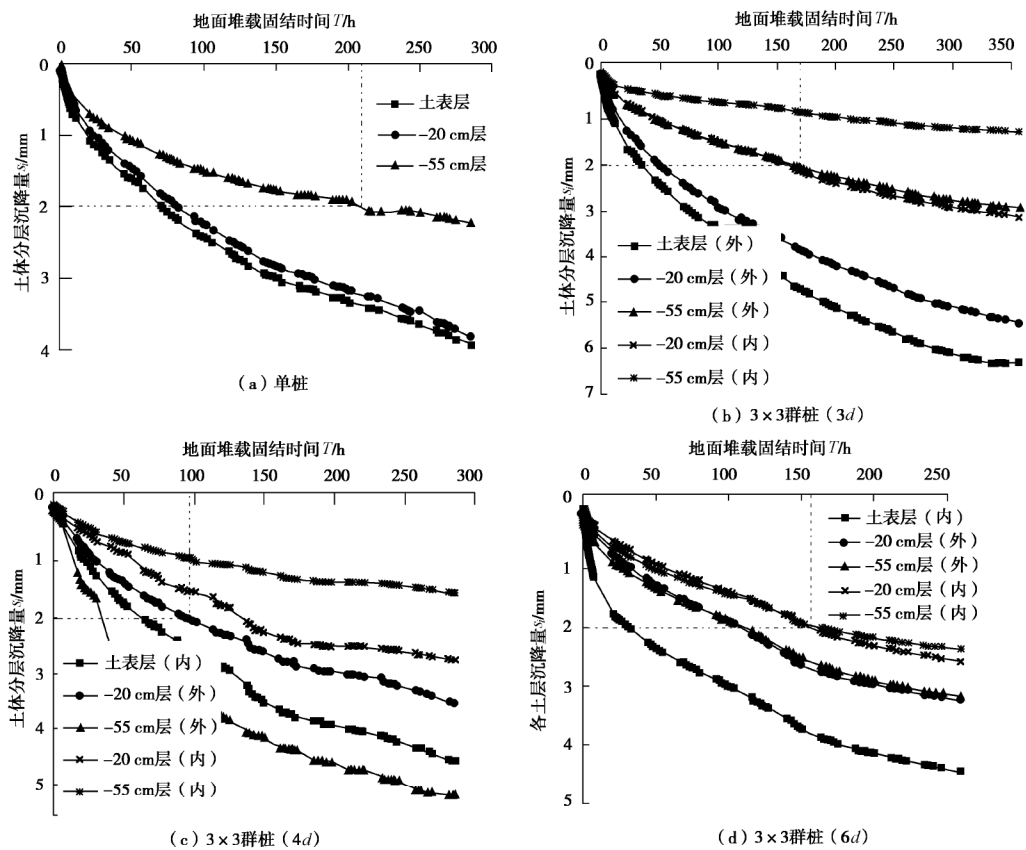


图 8 土体分层沉降随固结时间变化曲线

Fig. 8 Relationship between settlement of soil layer and consolidation time

表 2 最大桩身轴力和中性点位置随固结时间的变化规律

Table 2 Relationship among maximum dragload, position of neutral point and consolidation time

	固结 时间/h	单桩	2×2 群 桩(4d)	3×3 群桩(3d)			3×3 群桩(4d)			3×3 群桩(6d)		
				中心桩	边桩	角桩	中心桩	边桩	角桩	中心桩	边桩	角桩
最大桩 身轴力 /N	24	215.0	214.0	142.9	180.6	185.6	150.9	189.2	228.6	178.0	205.0	219.8
	72	248.5	239.0	160.8	200.7	224.6	168.3	206.1	230.0	220.0	221.0	250.0
	120	274.5	260.0	176.0	214.1	232.0	183.0	224.6	242.0	235.0	250.0	272.0
	168	288.0	276.0	195.0	229.2	260.0	208.0	247.8	260.0	248.0	267.0	288.0
	240	310.0	292.0	206.8	235.8	276.0	223.0	253.0	280.4	265.0	280.0	305.0
中性点 位置/cm	24	-65	-75	-65	-45	-35	-65	-65	-65	-75	-65	-55
	72	-75	-75	-65	-55	-55	-65	-65	-75	-75	-75	-75
	120	-75	-85	-85	-65	-75	-75	-75	-85	-75	-75	-75
	168	-85	-95	-85	-75	-85	-75	-85	-85	-95	-85	-85
	240	-95	-95	-85	-85	-85	-95	-95	-95	-95	-95	-95

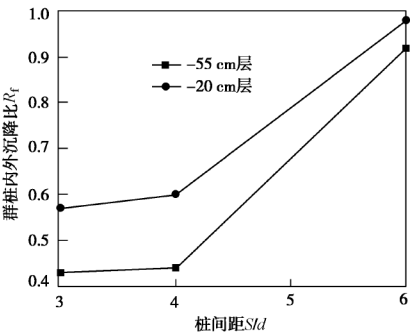


图 9 群桩内外分层沉降比与桩间距关系曲线

Fig. 9 Relationship between settlement ratio of soil layer and pile spacing

参考文献:

[1] 黄 强. 桩基工程若干热点技术问题[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1996. (HUANG Qiang. Some hotspot technical problems on pile foundation engineering[M]. Beijing: China of Building Materials Industry Press, 1996. (in Chinese))

[2] SAWAGUCHI M, TAKAHASHI K. Model test on negative friction acting on batter piles[C]// Proceedings of 32nd Japan Annual Meeting on Civil Engineering, 1977: 556 - 557. (in Japanese)

[3] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, TSUJI I, YUKITOMO H. Model

- tests on negative friction acting on piles[C]// Proceedings of 22nd Japan Sympo SMFE, 1977: 49 - 55. (in Japanese)
- [4] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative skin friction acting on piles[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(2): 29 - 39.
- [5] TOMA T M. A model study of negative skin friction on a fixed base pile in soft clay[D]. Edinburgh: Heriot-watt University, 1989.
- [6] 吴一伟, 费涵昌, 林侨兴, 等. 砂土液化对桩基的影响[J]. 同济大学学报, 1995, **23**(3): 360 - 364. (WU Yi-wei, FEI Han-chang, LIN Qiao-xing, et al. The effect of pile by sand clay liquefaction[J]. Journal of Tongji University, 1995, **23**(3): 360 - 364. (in Chinese))
- [7] 张晓健. 现浇混凝土薄壁管桩负摩阻力特性试验研究与分析[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG Xiao-jian. Test study on properties of negative skin friction of thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [8] 谢依航. 基桩负摩擦力之模型试验[D]. 台湾: 国立中央大学, 2006. (XIE Yi-hang. A model test for measuring downdrag behavior of a pile in a clay layer[D]. Taiwan: National Central University, 2006. (in Chinese))
- [9] 陈仁朋, 周万欢, 曹卫平, 等. 改进的桩土界面荷载传递双曲线模型及其在单桩负摩阻力时间效应研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(6): 824 - 830. (CHEN Ren-peng, ZHOU Wan-huang, CAO Wei-ping, et al. Improved hyperbolic model of load-transfer for pile-soil interface and its application in study of negative friction of single piles considering time effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(6): 824 - 830. (in Chinese))
- [10] 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. (XIA Li-nong. Theoretical and field test study on behavior of negative skin friction in piles[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese))
- [11] 肖俊华, 周国然, 袁聚云, 等. 高桩码头桩基础负摩阻力现场试验研究——上海洋山深水港工程现场试验[J]. 岩土力学, 2008, **29**(4): 1097 - 1102. (XIAO Jun-hua, ZHOU Guo-ran, YUAN Ju-yun, et al. In-situ tests on negative skin friction of piles in high-piled wharf—In-situ test in Shanghai Yangshan deep water port engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(4): 1097 - 1102. (in Chinese))
- [12] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 338 - 346. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 338 - 346. (in Chinese))
- [13] 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 on negative skin friction for single pile under surface load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2805 - 2810. (in Chinese))
- [14] 王兰民, 孙军杰, 黄雪峰, 等. 黄土场地地震陷时桩基负摩阻力的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(8): 341 - 348. (WANG Lan-min, SUN Jun-jie, HUANG Xue-feng, et al. Field tests on negative skin friction along piles caused by seismic settlement of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 341 - 348. (in Chinese))
- [15] FELLENIUS B H. Basics of foundation design[M]. 2nd ed. Richmond: BiTeech Publishers, 1999: 164.
- [16] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))