

黏土中静压沉桩离心模型

李雨浓¹⁾✉, Barry M Lehane²⁾, 刘清秉³⁾

1) 燕山大学建筑工程与力学学院, 秦皇岛 066004 2) 西澳大学土木工程与资源学院, 珀斯 6009 3) 中国地质大学(武汉) 三峡研究中心, 武汉 430074

✉ 通信作者, E-mail: liyunong-ren@163.com

摘要 采用西澳大学室内鼓轮式离心机, 在预先固结的高岭黏土中开展不同离心力场(50g, 125g 及 250g, g 为重力加速度) 条件下的模型压桩试验、T-bar 试验和静力触探试验, 分析了模型桩在贯入过程、静置稳定过程中桩身径向应力(σ_r) 的变化规律, 并对后期桩体拉伸荷载阶段的径向应力变化值($\Delta\sigma_r$) 及桩侧摩阻力变化情况进行了探讨, 揭示了在不同超固结比(OCRs) 黏土中静压桩侧摩阻力的演变特性. 在此基础上, 通过两种经验公式方法对桩侧摩承载力进行了预测计算和对比分析. 研究结果表明: 沉桩过程中桩端相对高度(h/B) 对桩身径向应力的发展变化有很大的影响, 桩身不同位置(h/B) 的总径向应力对同一贯入深度而言, 存在桩侧径向应力退化现象; 基于静力触探试验提出的经验方法, 能有效考虑静力触探锥端阻力(q_t) 和桩端相对高度(h/B) 因素的影响, 将其应用于黏土沉桩时桩侧摩阻力的预测, 可取得与试验实测结果较吻合的结果. 研究成果对软土地区静压桩施工与承载力设计具有一定的工程指导意义.

关键词 静压桩; 径向应力; 黏土; 桩侧承载力; 离心模型

分类号 TU473.1

Centrifuge modeling of jacked pile in clay

LI Yu-nong¹⁾✉, Barry M Lehane²⁾, LIU Qing-bing³⁾

1) College of Civil Engineering & Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2) School of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia, Perth 6009, Australia

3) Three Gorges Research Center, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

✉ Corresponding author, E-mail: liyunong-ren@163.com

ABSTRACT Notable contributions to our improved understanding of jacked pile behavior in sand have been achieved through instrumented model pile tests in laboratory test chambers, at elevated g -levels in the centrifuge, and in the field. In recent years, research focusing on pile behavior in clay has declined. Consequently, predictive methods for pile capacity have not advanced beyond those provided in American Petroleum Institute (API 2000) recommendations, which were based on research conducted in the early 1980s. This paper re-focuses attention on the shaft capacity of jacked piles in clay. Three centrifuge scale pile tests were performed in kaolin clay in the drum centrifuge at the University of Western Australia. The tests were performed in pre-consolidated blocks of kaolin, and were subsequently spun in the centrifuge at three different g -levels of 50g, 125g and 250g respectively. The piles were equipped with total pressure sensors located at different depths and were installed by jacking into samples of reconstituted kaolin clay. The kaolin clay samples were prepared to measure the range of the cone penetration test end resistance (q_t), undrained strengths (s_{u-Tbar}), and overconsolidation ratios (OCRs). These pile tests were used to investigate the lateral stress changes (σ_r) developed along the pile shafts during pile installation and equalization. In addition, the change in the value of lateral stress ($\Delta\sigma_r$) and the changes in pile shaft resistance during the pile tension test were discussed. The characteristics of the jacked pile in the clay with different over-consolidation ratios (OCRs) were revealed. Furthermore, the centrifuge data were subsequently used to examine the current design methods for the evaluation of the shaft capacity of displacement piles in clay. The centrifuge test results show that during the pile penetration, a strong de-

收稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51408527); 河北省自然科学基金青年基金资助项目(E2015203195)

pendence of lateral stress on the relative depth of the pile tip (h/B) develops, and the total radial stress, as measured in a particular soil horizon, is observed to decrease as the relative depth of the pile tip (h/B) increases (where h is the height of the sensor above the pile tip, and B is the diameter of the pile). Based on the cone penetration test during the investigation, it is observed that the lateral stress developed on a displacement pile is strongly depended on the cone penetration test end resistance (q_t) and the relative depth of the pile tip (h/B). It is shown that the empirical method allowing for a dependence of shaft friction on q_t , and h provides good estimates of the shaft capacities measured in centrifuge experiments. The research results have certain theoretical and engineering significance for pile construction and bearing capacity design in the soft soil region.

KEY WORDS jacked pile; radial stresses; clay; shaft capacity; centrifugal model

目前,静力压桩随其施工技术和机械的日益完善加之自身具有的诸多优势,深受工程界的重视并被广泛的应用在城市基础建设中。然而,在目前的桩基理论研究中,对静压沉桩的力学演变机理的认识仍较模糊,在实际工程中的应用仍停留在经验或半经验水平。因此,为揭示静压沉桩的真实物理机制,解决实际工程面临的问题,特别在以控制桩基沉降为主的设计理念日益为学术界及工程界所接受的背景下,对静压桩力学演变机理进行研究无疑成为桩基设计理论中明确桩土共同作用、优化沉降控制的关键。

近几十年来,国际力学界和岩土工程界诸多国内外学者对静压沉桩的物理力学机制问题也展开了许多的试验研究。Eide 等^[1]在工程中发现,桩体贯入黏性土层后,其承载力会随时间增加,并认为这主要是由于桩周超孔隙水压力消散引起的。Pestana 等^[2]通过实际现场监测了沉桩引起的超孔隙水压力和桩周土体水平位移情况。Hight 等^[3]研究了桩径对桩端承载力影响。研究表明,在一定的允许变形范围内,桩尖阻力随着桩径的增加而减小。Lehane 与 Gavin^[4]在干砂中进行了开口管桩沉桩大型模型试验,研究桩周土体应力、桩径和管桩壁厚度对管桩力学性状的影响。White 与 Bolton^[5]进行了一系列平面应变标定槽试验,研究桩尖贯入机理和桩土界面贯入特征。徐建平^[6]在软黏土中进行了静力压入单桩和双桩的模型试验,测量了沉桩过程中土体位移随水平和深度方向变化情况。丁佩民^[7]在砂土中进行了大型沉桩模型试验,研究砂土相对密度变化对其内摩擦角及邓肯双曲线弹性模型参数的影响。周健^[8]、王浩^[9]从桩端周围土体位移场、应力场、孔隙率变化场等角度,对砂土中桩端阻力随位移发挥的内在机理进行了模型试验研究。De Nicola 与 Randolph^[10]通过离心模型试验研究了贯入砂土中的管桩的力学性状以及土塞性状。陈文等^[11]在不同黏土土样中进行了静压桩贯入的离心模型试验,研究桩体贯入饱和黏土过程中,桩周土体

位移和超孔隙水压力的空间分布情况。White 与 Lehane^[12]用离心模型试验研究了沉桩过程中桩摩擦疲劳现象。Lehane 与 White^[13]进行了正常固结砂土中贯入闭口钢方桩的离心模型试验。通过实施贯入桩体的破坏性静载试验,研究了沉桩方法、应力水平以及桩截面纵横比对试验中桩侧水平有效应力增大的影响。刘清秉^[14]在砂土中进行了离心机试验,研究砂土颗粒形状对土体抗剪强度及桩端阻力的影响。李林^[15]在天然黏土中进行了静压桩离心机试验,研究了静压沉桩过程中桩周土压力、孔压及沉桩阻力的变化规律。李镜培等^[16-17]在饱和黏土中进行了静压沉桩的离心机试验,对桩周土体强度的时效性进行了分析。

可以看出,目前针对砂土中静压桩的沉桩机理及桩土相互作用已取得了显著的研究进展。然而,由于黏土固结时间长,孔隙水消散产生的固结时效性等原因,使得近些年对黏土中同等程度静压沉桩的试验研究相对较少。

基于此,本文通过在高岭黏土中进行的离心模型试验,分别对模型桩贯入过程、桩静置稳定过程及桩加载三个工作阶段中径向应力(σ_r)的变化规律进行详细地分析研究,旨在揭示黏土地基静压沉桩过程中桩侧摩擦阻力的力学演变特性,此外,采用两种经验公式方法对桩侧摩承载力进行预测计算并对两种方法进行对比分析。研究结果可进一步提高和加强对静压沉桩的理论认识,并可作为软土地区静压桩工程施工与设计提供科学依据和指导。

1 试验设备与装置

试验采用了西澳大学(UWA)土木学院的鼓轮式离心机,见图 1。该离心机环行槽外径 1.2 m,内径 0.8 m,环行槽高 0.3 m,最大离心加速度 300g。该离心机的主要特征就是具有独立的旋转中心轴和工具台,这使得在试验中不需要停止机器便可进行模型测试工具的转换,例如,安装 T-bar 和静力触探试验

(CPT) 测试仪器. 更多有关该离心机的详细细节可参见 Stewart 等^[18]的文献.



图1 西澳大学鼓轮式离心机
Fig. 1 Drum centrifuge in UWA

试验开始前,将装有黏土样的试验盒(土盒尺寸 258 mm × 163 mm × 160 mm) 固定到离心机内部环形槽中,模型桩头连接荷重传感器,两者一起被固定到离心机工作台中心处. 该荷重传感器用于在拉伸试验中量测桩轴向承载力. 具体的试验桩土的装置示意图见图 2.

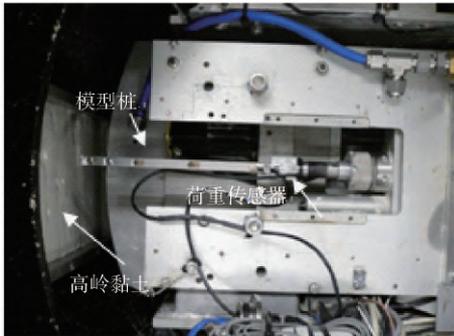


图2 试验布置示意图
Fig. 2 Test arrangement

2 试验方案

2.1 模型桩

本文离心试验采用的模型桩为边长(B) 9 mm, 长(L) 185 mm 的不锈钢闭口方桩. 图 3 为试验桩的详细结构图.

由图 3 可见,模型桩两侧距离桩端不同高度处共嵌入式安装 6 个直径为 6 mm 的土压力传感器($B_1, B_2, B_3, B_4, F_1, F_2$),其中, F_1 和 B_1 、 F_2 和 B_2 对称布置桩身底部两侧位置用于校核试验过程中监测的径向应力数据. 不同高度的土压力传感器用于量测桩身不同位置($h/B = 1, 3, 6$ 和 12 ; h 为土压力传感器距桩端的距离)处的径向应力(σ_r). 这些压力传感器最大量程可达到 750 kPa,此外,在试验前这些传感器都已经过精确的标定. 具体的模型桩制

作情况可参见 White 等人^[12]的文献. 由于本试验桩最大贯入深度为 110 mm,考虑到试验的准确性,故不分析传感器 B_4 的变化. 本次离心机试验模型比尺(N) 分别取 50g、125g 和 250g.

2.2 土样的制备与物理力学特性

本试验土样采用的是预先固结的西澳大学高岭黏土. 有关高岭黏土的相关物理参数见表 1.

表1 模型试验高岭黏土基本物理参数
Table 1 Parameters of Kaolin clay in tests

含水量, $w/\%$	有效重度, $\gamma'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比, e	塑性指 数 I_p	灵敏度, S_t	桩土摩擦角, $\delta_t/(\text{°})$
45	7.0	1.2	34	2.5	18

试验前黏土样事先用 150 kPa 的压力进行预压固结. 该预先固结压力是结合不同重力场 50g、125g 及 250g 情况确定的,以获得不同重力场下黏土的超固结比(OCR). 本次离心试验中,离心加速度为 50g、125g 及 250g 情况下,30 mm 深度以下黏土的平均超固结比 OCR 分别为 7.46、2.78 和 1.53,分别代表土样的超固结状态、轻微超固结状态和正常固结状态. 不同重力场下 OCR 沿深度的分布情况见图 4.

试验过程中对不同重力场情况下的土样进行了 T-bar 试验,测得了土体的不排水剪切强度 s_{u-Tbar} . 有关三个不同重力场下的 s_{u-Tbar} 数据记录见图 5.

2.3 试验设计

本次试验在不同重力场下分别进行了模型桩试验和静力触探试验. 有关 3 个不同重力场下的静力触探试验端阻力(q_t) 记录见图 6.

试验时,模型桩先以 $0.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度被贯入到土样中,在 50g 和 125g 两个离心场试验中桩贯入深度均为 110 mm,而在 250g 情况下则相对较小为 95 mm. 此外,由于在贯桩过程中,将会产生较大的孔隙水压力,根据 Houlsby 和 Teh^[19]的研究结果表明,贯桩结束后将模型桩静置 2 h 有利于至少 85% 的孔隙水压力的消散. 故本试验模型桩在贯桩阶段结束后被静置 2 h 再开始进行桩轴向载荷的拉伸试验. 试验时,模型桩以 $0.001 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度被上提到最大位移 2 mm,之后模型桩试验结束.

3 试验结果

3.1 贯入过程结果分析

试验结果发现,在静压沉桩过程中桩身径向应力随着测试元件相对桩端距离(h/B) 的不同而有所变化. 图 7 为 50g 试验情况模型桩侧 3 个不同位置处的总径向应力沿贯入深度的分布曲线.

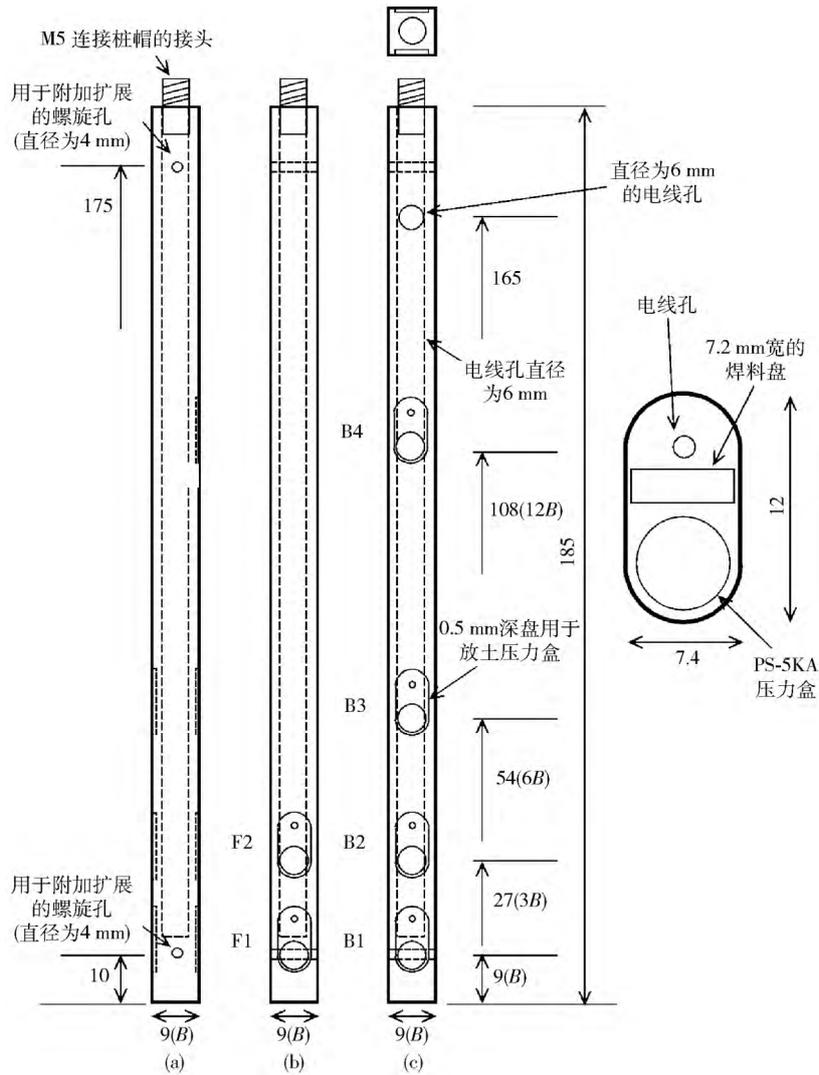


图 3 模型桩身应变片布置图 (单位: mm) . (a) 正面图; (b) 左视图; (c) 右视图

Fig. 3 Instrumented model pile (unit: mm) : (a) front view; (b) left view; (c) right view

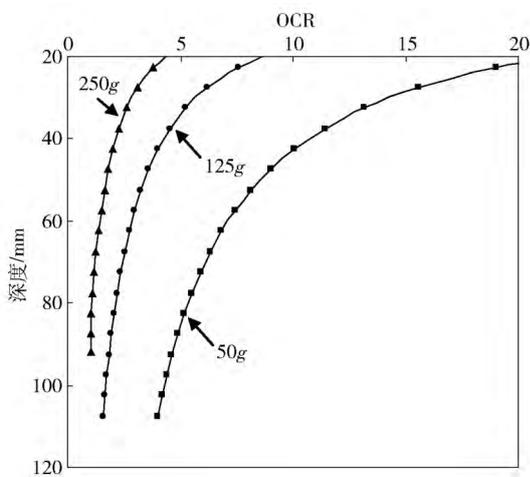


图 4 不同重力场下 OCR 沿深度分布图

Fig. 4 OCR profiles in different g -levels

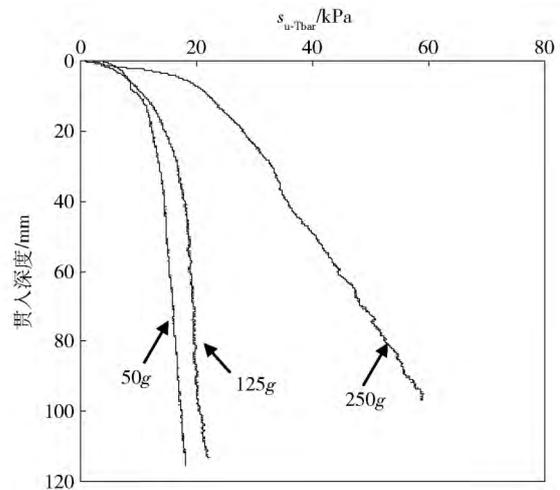


图 5 不同重力场下的 s_{u-Tbar} 曲线

Fig. 5 s_{u-Tbar} profiles in different g -levels

由图可以看出,在桩贯入阶段,桩身不同位置的总径向应力随着深度的增加而线性增加;而不同部位的桩侧元件在同一贯入深度处,总径向应力随着

h/B 的增加而减小。将总径向应力归一化,用 $H_i = (\sigma_r - u_0) / \sigma'_{v0}$ 表示,式中 u_0 和 σ'_{v0} 分别为测试元

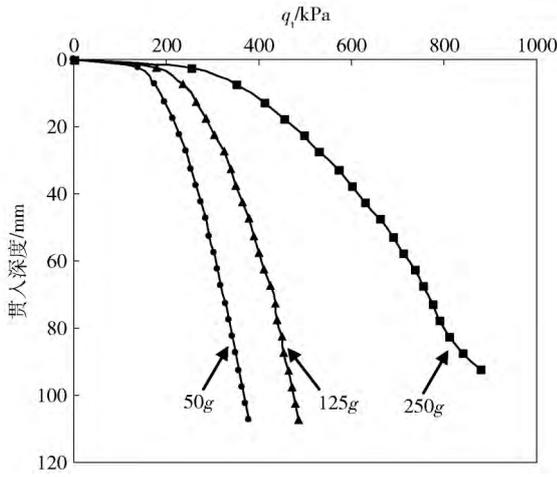
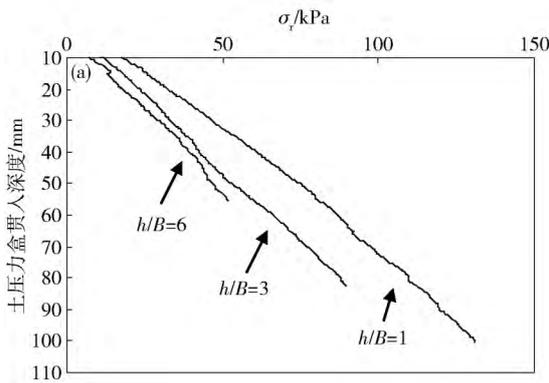


图6 不同重力场下的静力触探试验曲线
Fig. 6 CPT profiles in different g -levels



件深度处的孔压和有效垂直应力,分析结果发现,在同一水平深度处, H_i 随着 h/B 的增加而降低。

在 125g 和 250g 试验中,同样出现了相似的变化规律,如图 8 和图 9 所示。

该离心试验结果与 Lehané^[20] 现场试验结果一致,即桩侧元件距桩端距离越远,不同部位的桩侧元件在同一贯入深度处径向应力越小。试验研究结果也进一步证实,桩侧摩阻力在贯入过程中同一水平深度上存在“退化效应”,可见桩端相对距离 (h/B) 对桩侧摩阻力有一定的影响,故在计算桩侧摩阻力时,为了避免估算过大,有必要考虑桩的长度效应。

3.2 静置稳定过程分析

在桩贯入后静置稳定期间不同重力场桩侧总径向应力的变化见图 10。

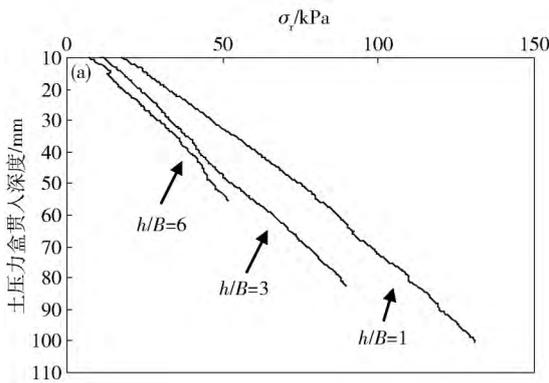


图7 50g 试验压桩过程中径向总应力 (a) 及其量纲为一化 (b)

Fig. 7 Lateral total stresses (a) and normalized lateral total stresses (b) during pile installation at 50g

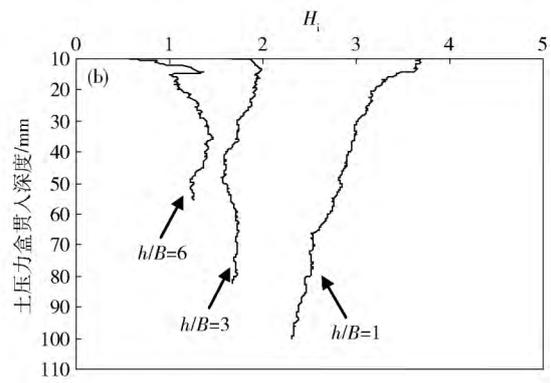
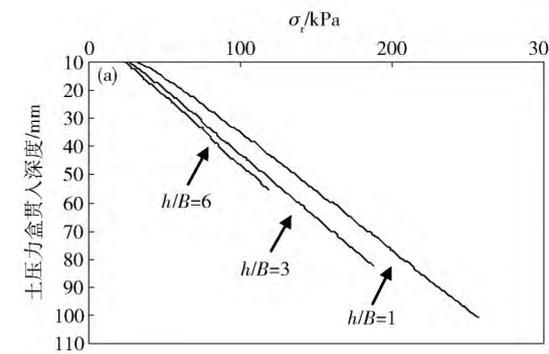


图8 125g 试验压桩过程中径向总应力 (a) 及其量纲为一化 (b)

Fig. 8 Lateral total stresses (a) and normalized lateral total stresses (b) during pile installation at 125g

图中用量纲为一系数 H/H_i 进行表示,这里 $H/H_i = (\sigma_r - u_0) / (\sigma_{ri} - u_0)$, σ_{ri} 为桩贯入结束后的径向应力。由图 10 可见,在桩贯入结束后,不同重力场下 H/H_i 在静置稳定期间均减小为大约贯入时的 50%。试验发现的这一变化规律与 Lehané^[20] 在现场黏土中进行的贯桩试验结果一致。对比所有不同重力场下的离心机试验结果发现,静置稳定期间在桩侧不同部位的应力传感器测得 H/H_i 的最终值均

约为 0.6 ± 0.15 。

当桩贯入结束后,对于 3 个不同重力场下的径向总应力均用了将近 50 min 时间达到稳定,依据 Houlsby 与 Teh^[19] 提出的时间因数,本次离心试验稳定的速率相当于水平固结系数约为 $25 \text{ m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

此外,对比早期 Lehané^[20] 总结的有关位移桩 (特指静压桩和打入桩) 试验稳定时应力状态的结果发现,作用在本次离心机桩上的径向应力值一般

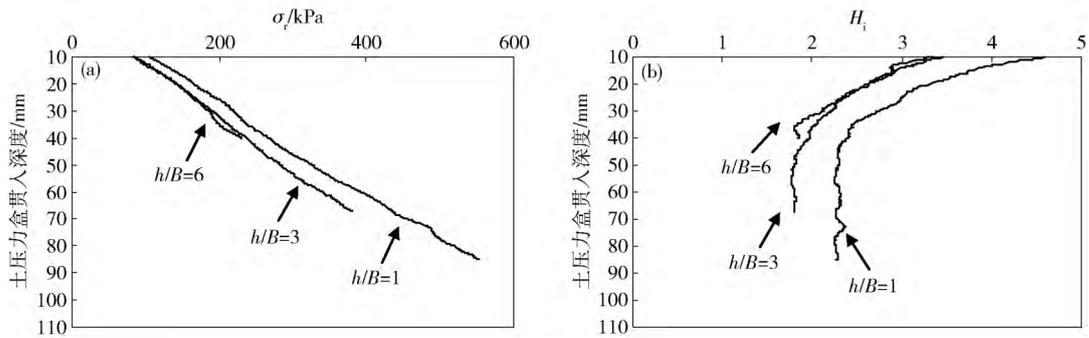


图 9 250g 试验压桩过程中径向总应力 (a) 及其量纲为一化 (b)

Fig. 9 Lateral total stresses (a) and normalized lateral total stresses (b) during pile installation at 250g

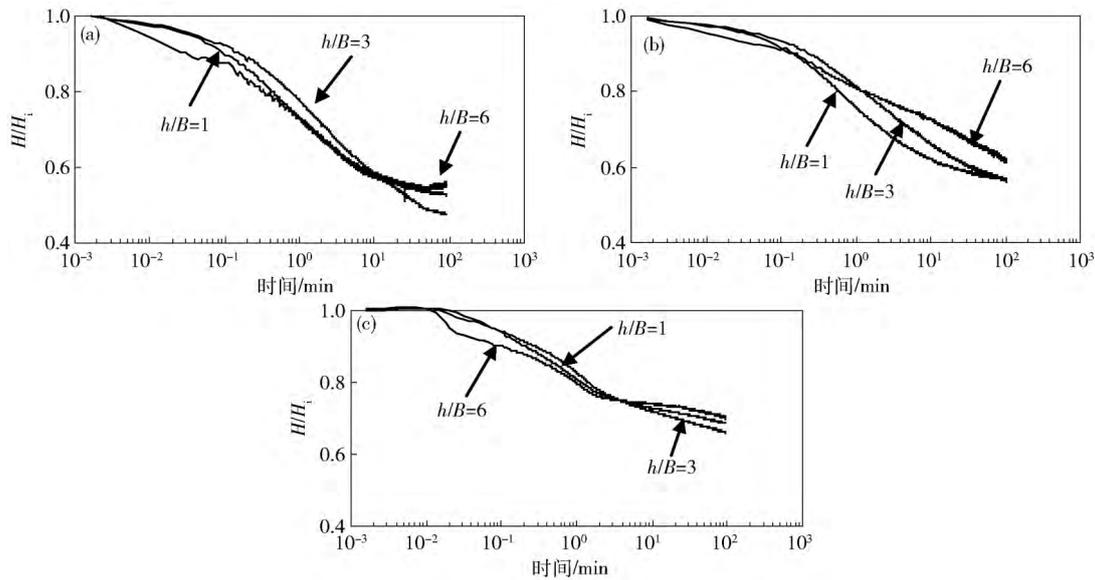


图 10 桩静置稳定过程中不同重力场下量纲为一的径向总应力. (a) 50g; (b) 125g; (c) 250g

Fig. 10 Normalised lateral total stress variations during equalisation at different g -levels: (a) 50g; (b) 125g; (c) 250g

低于 Lehane 试验值的 25% 左右. 这一趋势也表明, 在无结构重塑的黏土中沉桩, 作用在位移桩桩侧的径向应力一般较低.

3.3 桩拉伸载荷试验

不同重力场情况下桩拉伸阶段桩侧径向总应力的变化值 ($\Delta\sigma_r$) 及侧摩阻力 (q_s) 的载荷曲线分别如图 11 图 12 所示.

由图 11 可见, 在桩端位移达到 0.25 mm 时, $\Delta\sigma_r$ 发生突变, 减小为原来的 85% ~ 90%; 随着桩的进一步拉伸, $\Delta\sigma_r$ 迅速减小, 并且不同深度处测得的应力变化值也不相同. 在拉伸试验结束后, 随着 h/B 的增加, 同一深度处 $\Delta\sigma_r$ 的绝对值也随之减小; 对比载荷曲线 (图 12), 在 $\Delta\sigma_r$ 发生突变处, 即桩位移达到 0.25 mm (桩端最大位移的 10% 左右) 时, 桩侧摩阻力也达到最大值, 之后随着深度增加逐渐达到常值不变.

3.4 桩侧摩承载力

黏性土中静压桩侧摩阻力计算, 尽管常采用

数值模拟和理论分析方法, 但在实际应用中, 采用经验公式进行预测仍不失为一种快速可靠的方法. 本文采用美国石油学会推荐标准 (API2000) [21] 以及 Lehane 等 [22] 基于静力触探试验提出的经验方法 (CPT2013) 对桩侧摩阻力进行了计算对比分析.

API2000 标准被广泛用来估算桩侧摩阻力. 计算桩侧摩阻力公式如下:

$$\tau_f = a s_{u-uc} \quad (1)$$

$$a = 0.5 (s_{u-uc}/\sigma'_{v0})^{-0.5} \quad s_{u-uc}/\sigma'_{v0} \leq 1 \quad (2)$$

$$a = 0.5 (s_{u-uc}/\sigma'_{v0})^{-0.25} \quad s_{u-uc}/\sigma'_{v0} > 1 \quad (3)$$

式中 τ_f 为桩侧单位极限摩阻力; s_{u-uc} 为不排水剪切强度; σ'_{v0} 为桩侧垂直有效应力.

Lehane 等基于静力触探试验方法测得的端阻力 (q_t) 提出的经验公式如下:

$$\tau_f = 0.055 q_t \left[\max \left(\frac{h}{R^*}, 1 \right) \right]^{-0.2} \quad (4)$$

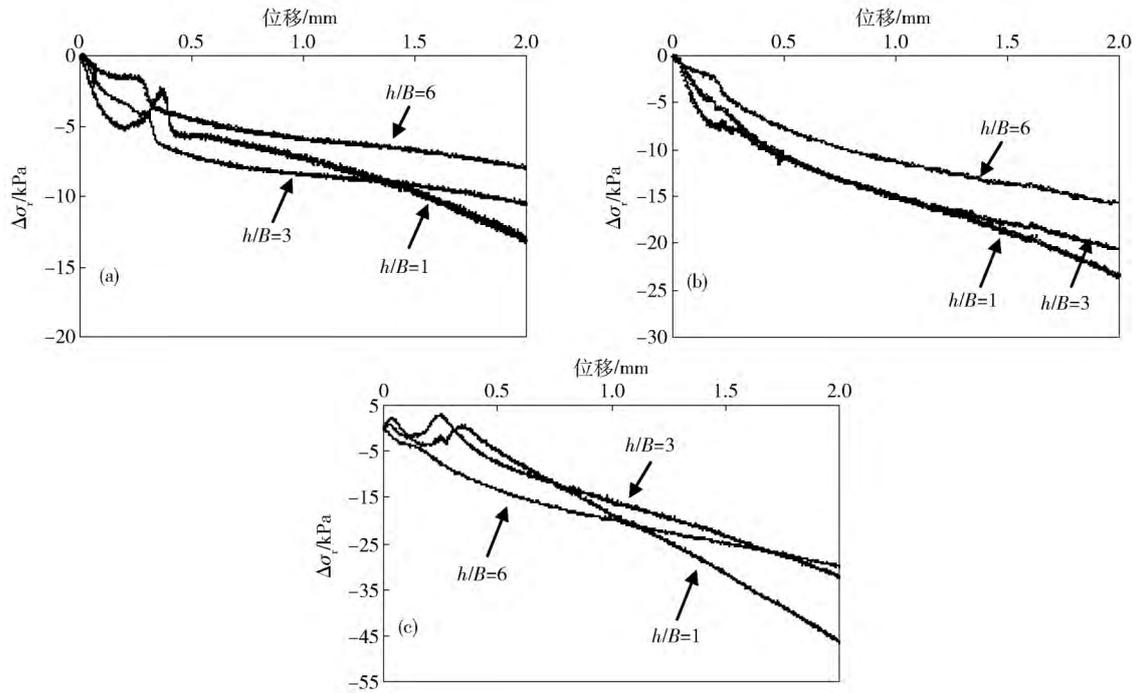


图 11 桩加载过程中不同重力场下径向总应力. (a) 50g; (b) 125g; (c) 250g

Fig. 11 Lateral total stress variations during loading at different g -levels: (a) 50g; (b) 125g; (c) 250g

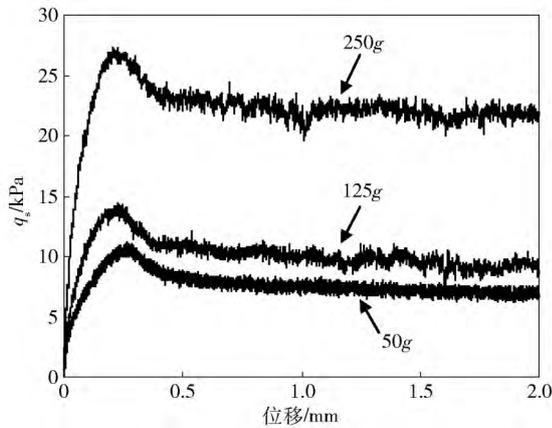


图 12 不同重力场下桩侧摩阻力

Fig. 12 Profile of q_s at different g -levels in tension test

$$\tau_f = \frac{0.023 q_t \left[\max \left(\frac{h}{R^*}, 1 \right) \right]^{-0.2}}{\left(\frac{q_t}{\sigma'_v} \right)^{0.15}} \tan \delta_f \quad (5)$$

式中 R^* 为桩的有效半径(当开口管桩时 $R^* = (R^2 - R_i^2)^{0.5}$, R 和 R_i 分别为开口管桩的内外半径); σ'_v 为桩侧垂直有效应力. 方程(4)是针对一些桩基工程无法明确桩土内摩擦角而得出的公式; 方程(5)则针对可以确定桩土内摩擦角及桩侧垂直有效应力的桩基工程给出的回归公式.

两种经验方法的计算值(Q_c)与离心机实测值(Q_m)比值的变异系数(COV)可见表2.

表2中API2000方法式(1)中的不排水剪切强

表 2 离心机试验桩抗拉承载力预测结果

Table 2 Tension capacity predictions for drum centrifuge test pile

方法	Q_c / Q_m					
	50g	125g	250g	平均值 μ	标准差 σ	COV
API 2000	0.84	1.23	1.31	1.12	0.25	0.22
方程(4)	1.09	1.25	1.15	1.16	0.08	0.07
方程(5)	0.99	1.24	1.16	1.13	0.13	0.12

度 s_{u-uc} 值是采用离心机试验的实测值 s_{u-Tbar} (见图4)计算的. 通过对比表中数据结果发现,在3个不同重力场下两种方法的预测值都偏高百分之十几左右,但是很明显采用基于CPT2013方法预测的结果COV要比API2000方法低45%~68%,可以得到更合理可靠的预测结果. 可见计算桩侧摩阻力时,如能考虑桩的 h/R^* (或长度效应)这一主要影响因素可以得到更满意的预测结果.

4 结论

(1) 在桩贯入阶段,桩身不同位置的总径向应力随着深度的增加而线性增加;而对同一贯入深度而言,该处总径向应力随着 h/B 的增加而减小. 故在黏土中沉桩时,为了避免桩侧摩阻力值估算过大,需要考虑桩的长度效应.

(2) 在桩贯入结束后,对比所有不同重力场下的离心机试验结果发现,静置稳定期间在桩侧不同部位的应力传感器测得 H/H_i 的最终值均比桩贯入

阶段减小 50% 左右。

(3) 桩在加载阶段,当桩端位移达到大约 3% B 时 $\Delta\sigma_r$ 发生突变,桩侧摩阻力达到最大值,并且发现 250g 下测得桩侧摩阻力峰值大约为 50g 情况下的 2.5 倍。

(4) 在离心机黏土试验中,桩在贯入阶段、静置稳定阶段和加载阶段桩侧不同深度位置径向应力表现的特征与现场试验桩测得的结果相似,但离心试验测得数值要小于现场值,分析原因可能是由于离心机所用的高岭黏土与实际天然黏土性质不同所致。

(5) 在黏土中沉桩,估算桩侧摩阻力时,API2000 方法可以得到比较好的预测结果,但是考虑桩的 h/R^* (或长度效应)这一主要影响因素的 CPT2013 方法可以获得更合理满意的预测结果。

参 考 文 献

[1] Eide O, Hutchinson J N, Landava A. Short and long term test loading of a friction pile in clay. *Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt*, 1997, 200: 1

[2] Pestana J M, Hunt C E, Bray J D. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2002, 128(1): 1

[3] Hight D W, Lawrence D M, Farquhar G B, et al. Evidence for scale effects in the end bearing capacity of open-ended piles in sand // *Offshore Technology Conference*. Houston, 1996: 181

[4] Lehane B M, Gavin K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2001, 127(6): 473

[5] White D J, Bolton M D. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand. *Geotechnique*, 2004, 54(6): 375

[6] Xu J P, Zhou J, Xu Z Y, et al. Model test research on pile driving effect of squeezing against soil. *Rock Soil Mech*, 2000, 21(3): 235
(徐建平,周健,许朝阳,等.沉桩挤土效应的模型试验研究.岩石力学,2000,21(3):235)

[7] Ding P M, Xiao Z B, Shi J Y. Model tests of large driven pile jacked into sands and soil-pile interaction finite element analysis with compaction effects taken into account. *Ind Constr*, 2003, 33(3): 45
(丁佩民,肖志斌,施健勇.松砂中大型静压沉桩模型试验研究桩基挤土加密效应.工业建筑,2003,33(3):45)

[8] Zhou J, Deng Y B, Ye J Z, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand. *Chin J Geotech Eng*, 2009, 31(4): 501
(周健,邓益兵,叶建忠,等.砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟.岩土工程学报,2009,31(4):501)

[9] Wang H, Zhou J, Deng Z H. Mobilization of toe resistance of piles with local displacement in sand. *Chin J Geotech Eng*, 2006, 28

(5): 587
(王浩,周健,邓志辉.砂土中桩端阻力随位移发挥的内在机理研究.岩土工程学报,2006,28(5):587)

[10] De Nicola A, Randolph M F. Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 295

[11] Chen W, Shi J Y, Gong Y P, et al. Centrifugal model tests of piles jacked in saturated clay. *J Hohai Univ*, 1999, 27(6): 103
(陈文,施建勇,龚友平,等.饱和黏土中静压桩挤土效应的离心机模型试验研究.河海大学学报,1999,27(6):103)

[12] White D J, Lehane B M. Friction fatigue on displacement piles in sand. *Geotechnique*, 2004, 54(10): 645

[13] Lehane B M, White D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand. *Can Geotech J*, 2005, 42(4): 1039

[14] Liu Q B, Xiang W, Lehane B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(2): 400
(刘清秉,项伟, B. M. Lehane, 等.颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究.岩石力学与工程学报,2011,30(2):400)

[15] Li L, Li J P, Sun D A, et al. Pile jacking-in effects considering stress anisotropy of natural clay. *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35(5): 1055
(李林,李镜培,孙德安,等.考虑天然黏土应力各向异性的静压沉桩效应研究.岩石力学与工程学报,2016,35(5):1055)

[16] Li J P, Zhang L X, Li L. Time-dependent analysis on strength of soil around jacked pile in saturated clay. *J Harbin Inst Technol*, 2016, 48(12): 89
(李镜培,张凌翔,李林.饱和黏土中静压桩桩周土体强度时效性分析.哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):89)

[17] Li J P, Li L, Sun D A, et al. Time-dependent bearing capacity of jacked piles in K_0 consolidated clay based on CPTU tests. *Chin J Geotech Eng*, 2017, 39(2): 193
(李镜培,李林,孙德安,等.基于CPTU测试的 K_0 固结黏土中静压桩时变承载力研究.岩土工程学报,2017,39(2):193)

[18] Stewart D P, Boyle R S, Randolph M F. Experience with a new drum centrifuge // *Proceeding International Conference Centrifuge* 98. Tokyo, 1998: 35

[19] Houlsby G T, Teh C I. Analysis of the piezocone in clay // *Proceeding of International Symposium on Penetration Testing*. Orlando, 1988: 777

[20] Lehane B M. *Experimental Investigations of Pile Behaviour Using Instrumented Field Piles* [Dissertation]. London: University of London (Imperial College), 1992

[21] American Petroleum Institute, (API). *Recommended Practice of Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. Washington, D. C: American Petroleum, 2000

[22] Lehane B M, Li Y N, Williams R. Shaft capacity of displacement piles in clay using the cone penetration test. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2013, 139(2): 253