

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.006

田兆丰, 王建华, 范怡飞. 钻井船插拔桩对邻近桩影响的模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 41-47. (TIAN Zhaofeng, WANG Jianhua, FAN Yifei. Scale model tests on effects of spudcan penetration and extraction on adjacent piles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 41-47. (in Chinese))

钻井船插拔桩对邻近桩影响的模型试验

田兆丰^{1,2}, 王建华^{1,2}, 范怡飞^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 岩土工程研究所, 天津 300072)

摘要: 为评价黏土中钻井船插、拔桩对邻近桩基础的影响,开展了自由桩头条件下的 1g 模型试验,得出插、拔桩过程中所测量物理量数据变化规律,为后续离心模型试验提供了数据基础和试验方法。试验得到各物理量变化规律如下:插桩条件下,随着插桩深度的增加,邻近桩桩身最大弯矩产生的位置及最大土体水平位移产生的位置逐渐加深;拔桩条件下,最大桩身弯矩及最大土体位移值逐渐减小,但拔桩完成后桩身位移和土体位移都未恢复到初始桩状态;插桩初始阶段插桩阻力迅速增加,之后逐渐趋于稳定,拔桩初始阶段拔桩阻力迅速增加,随后进入相对稳定阶段,在桩靴距离土体表面约 120 mm 时,阻力突降为 0。试验分析结果表明,土体位移变化直接导致桩身响应变化,两者存在一定正相关性。

关键词: 1g 模型试验; 自由桩头; 桩靴; 邻近桩; 插桩; 拔桩

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)05-0041-07

当前自升式钻井船的桩靴直径一般在十几至二十几米之间,在桩靴贯入海床及从土体中拔出的过程中会排开大量土体。很多情况下自升式钻井会影响邻近导管架平台作业,因此在插、拔桩过程中土体的移动将会对邻近导管架平台的桩基础产生一定影响。为了分析这一影响,国内外众多科研人员进行了相关研究,主要开展了数值模拟^[1-4]及模型试验。在模型试验方面,Hossain 等于 2006 年针对单一黏土层,通过开展离心模型试验,得出了桩周围土体流动形式^[5];Springman^[6]和 Stewart^[7]给出了桩基础邻近大坝时,受影响桩桩身弯矩分布情况;根据桩身受到土体水平位移时桩身响应的数值分析,Lee 提出了 4 种不同的破坏形式^[8];吴永韧等^[9]进行了砂土中的 1g 模型试验研究,仅测量了桩头位移;Siciliano 等^[10-12]进行了相关的离心模型试验研究,对土体位移及对邻近桩的影响进行分析。土体变形和桩身响应是相互联系的,但同时插拔桩过程中研究土体位移和桩身内力和变形的相关模型试验较少,结论的准确性有待验证,该课题需要进一步研究分析。

本文进行了自由桩头条件下黏土地中钻井船插拔桩 1g 模型试验,模拟钻井船插拔桩对邻近桩的影响。试验过程中主要监测并记录邻近桩桩身弯矩、土体水平位移、桩头水平位移及插拔桩阻力等,对测量物理量进行分析,结合土体位移变化与桩身响应进行综合分析,在一定程度上阐明两者之间的关系。

1 1g 模型试验

由于试验土箱的限制,该试验几何相似比为 1:100。工程中桩靴为刚性体,不对其材料进行相似分析。邻近桩为柔性桩,桩身的环形内径为 10.0 mm,外径为 12.4 mm;入土深度为 900 mm。桩身材料为铝合金,弹性模量为 70 GPa,对应原型桩材料为铝合金,弹性模量为 70 GPa,弹性模量的相似比为 1:1。

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579174)

作者简介: 田兆丰(1992—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事海洋土力学研究。

E-mail: 2014205086@tju.edu.cn 通信作者: 王建华(E-mail: tdwjh@eyou.cn)

试验在 $1g$ 条件下进行,虽然邻近桩及桩靴满足几何相似和材料模量相似,但是受模型比尺影响对应位置土中的自重应力减小为原型自重应力的 $1/100$ 。 $1g$ 模型试验中不能复制土体非线性及受应力影响的性质,不能再现原型试验,但是针对 $1g$ 条件下数据变化规律进行分析,为实验室后续离心模型试验提供经验及方法。

1.1 试验用土箱及土层

试验用土箱长 1.2 m ,宽 1.0 m ,高 1.2 m 。试验在黏土中进行,制土方法参见文献[13],土层厚 0.9 m ,物理性质指标为含水率 42% ,天然重度 17.88 kN/m^3 ,液限 44.44% ,塑限 27.01% ,塑性指数 17.43 。

在试验开始前使用电动十字板对土体的不排水剪切强度 S_u 进行了测量。共测量 9 个点位不同深度 S_u 值,如图 1 所示。试验结果表明:土体沿深度方向不排水抗剪强度有所增加但变化较小,土层均匀性良好,平均不排水抗剪强度为 7.4 kPa 。

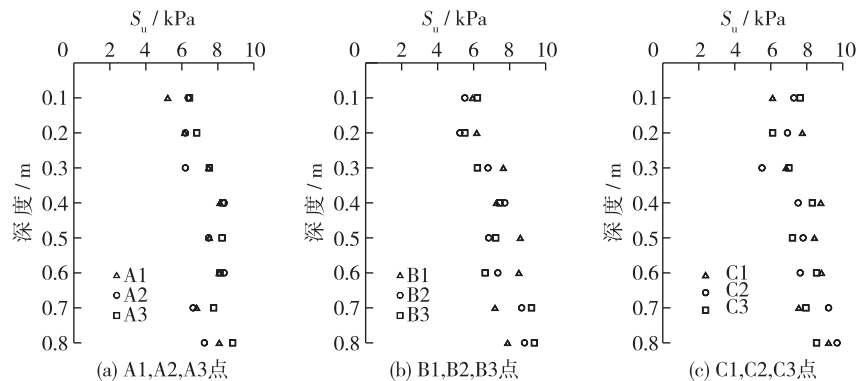


图 1 试验土层不排水抗剪强度值

Fig. 1 Undrained shear strength of test soil layer

1.2 模型试验装置及安装

试验所用桩靴模型截面为圆形,其最大直径为 180 mm ,用 D 表示,如图 2 和 3 所示。试验中插、拔桩速为 0.1 mm/s ,试验所用加载机构为伺服控制系统,主要包括计算机、波形发生器、伺服控制器、伺服电机及与之连接的电动缸。电动缸通过加载架竖直安装在试验土箱上,连接力传感器后与桩靴相连,如图 3(a) 所示。为了研究邻近桩与桩靴之间距离对试验结果的影响,在距离桩靴 $0.25D$ 和 $0.50D$ 两种条件下安装邻近桩及土体位移测量装置。

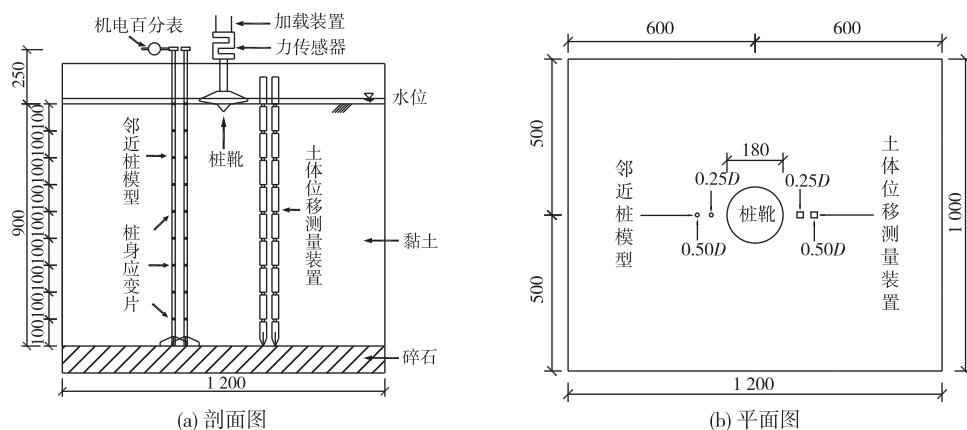


图 2 试验设备安装布置示意(单位:mm)

Fig. 2 Layout of test equipment installation(unit: mm)

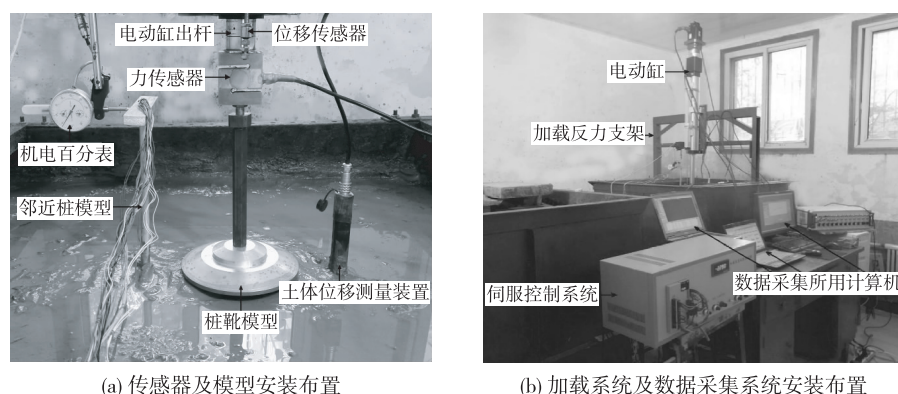


图3 试验设备安装布置实物

Fig. 3 Layout of test equipment installation

试验选用内径 10.0 mm, 外径 12.4 mm, 长 1.1 m 的铝合金管材制作邻近桩模型。桩身布置 9 对应变片, 间隔 0.1 m, 用于测量桩身弯矩, 如图 2(a) 所示。由于模型桩需要在饱和软黏土中工作, 在应变片安装完成后用防水胶进行了密封处理。桩头为自由状态, 试验中模型桩受到挤土力的作用, 桩头产生水平位移, 通过机电百分表测量试验桩头水平位移, 测量位置距离土体表面 250 mm, 如图 2 和 3 所示。

采用拉杆式位移传感器对桩靴深度进行了监测。安装方法如图 3 所示, 将其竖直固定在电动缸一侧, 使用连接件与电动缸出杆连接。在桩靴连接杆和电动缸加载杆之间安装力传感器测量插拔桩靴过程中阻力。

在钻井船插桩试验中, 桩靴竖直向下逐渐贯入土体内部, 在此过程中, 桩靴挤压土体, 使桩靴周围土体向外及向下运动。为了测量试验过程中的土体水平位移, 开发出土体位移测量系统, 该系统主要包括: 楔形端头、测量单元、航空接头、引线、USB 接头、橡胶套管及数据采集系统, 测量设备竖直安装在土体中, 当桩靴插入土体时, 土体产生变形, 设备测量单元逐渐倾斜, 其工作状态如图 4 所示。

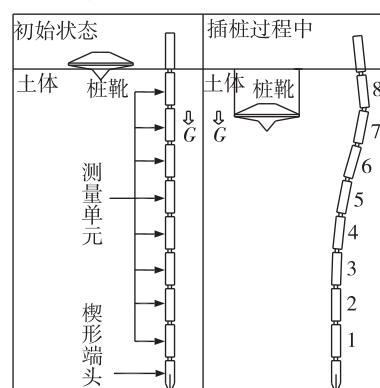


图4 土体位移测量装置工作示意

Fig. 4 Working conditions of soil displacement measuring equipment

测量装置核心构件为 8 个测量单元, 从底部到顶部依次编号为 1 号到 8 号, 测量单元之间通过铰接钉相连, 保证相邻单元之间可以灵活转动。因为设备最底端的楔形端头固定, 所以将楔形端头与 1 号测量单元铰接处作为计算土体水平位移的零点。从最底端的 1 号测量单元开始计算, 由 1 号测量单元测出的角度变化值转化为弧度变化值 $\Delta\alpha$ 后, 与两铰接钉之间的距离 l (0.1) 相乘, 即可得到 1 号与 2 号测量单元铰接处的水平位移, 试验中认为铰接处位移即为该深度处土体水平位移; 采用相同方法计算 2 号与 3 号测量单元铰接处相对水平位移后, 与上一铰接处水平位移相加可得该位置实际水平位移; 以此类推, 计算出所有铰接位置处土体水平位移, 即为不同深度处土体水平位移。

在试验过程中土体只产生桩靴径向的位移, 土体位移测量设备安装时应保证设备转动方向与桩靴径向相一致。将设备对准待测位置, 使用压杆将其竖向压入土体中。邻近桩模型安装时保证应变片朝向桩靴, 垂直插入土体中, 之后安装机电百分表, 测量插桩试验过程中桩头的水平位移。

1.3 模型试验过程

模型试验具体过程^[14]: ①试验所用模型桩及土体位移测量装置安装完成后, 经过 4 d 土体恢复后进行试验。②试验中保持插桩速率为 0.1 mm/s, 插桩深度达到 0.45 m 后插桩阶段完成。③模拟钻井船工作阶

段,切换伺服控制器工作模式,使阻力保持在插桩最大阻力的 90%持续 9 h,在这个过程中桩靴仍然向下运动,最终深度可以达到 0.48 m。④随后进入拔桩阶段,拔桩速率与插桩速率相同,当桩靴提升至插桩初始位置时试验结束。⑤移除试验设备,对土体进行堆载固结,等待土体强度恢复进行下一次试验。

2 试验结果及分析

2.1 弯 矩

两次试验邻近桩边缘距桩靴边缘距离分别为 $0.25D$ 和 $0.50D$,试验测量插拔桩过程中桩身弯矩随桩靴深度的变化,如图 5 所示。

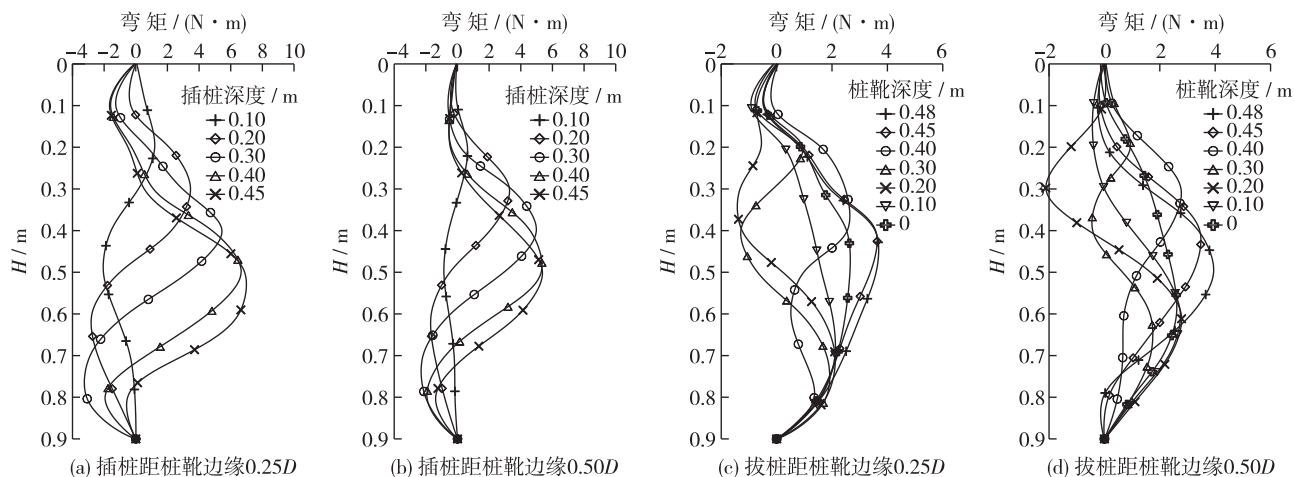


图 5 桩身弯矩随桩靴深度变化

Fig. 5 Curves of pile moment along pile at different spudcan depths

试验结果表明:①随着插桩深度的增加,出现桩身最大正弯矩及负弯矩的土体深度逐渐增加,桩身正弯矩也逐渐增大;随着桩靴与邻近桩距离的增加,同一插桩深度下桩身所受最大弯矩逐渐减小,表明插桩对邻近桩的影响逐渐减小;②在模拟钻井船工作阶段过程中,桩靴进一步插入土体中 0.03 m,拔桩初始位置桩靴深度为 0.48 m;③随着桩靴提升,第一阶段最大桩身弯矩逐渐减小后逐渐增加并达到最大,第二阶段桩身弯矩减小后增加随后恒定;④两次试验桩靴拔出后桩身最大残余弯矩为插桩最大弯矩的 41.4%和 50.9%,桩靴拔除后邻近桩桩身仍然残余较大弯矩,插拔桩产生的土体变形仍然对邻近桩造成较大影响;⑤插桩完成后,邻近桩受到较大的挤土作用产生较大桩身弯矩,桩靴拔除后,虽然挤土力的作用降低,桩身弯矩减小,但桩身仍然存在较大残余弯矩。实际工程中,插桩及拔桩的过程都会选择在较好的工况下进行,但是钻井船邻近导管架平台工作阶段及钻井船工作完成离开平台后,邻近平台会遇到各种复杂工况,此时桩身受各种荷载及挤土力共同作用,在平台设计时应考虑该因素造成的影响,以确保安全。

2.2 土体位移

两次试验土体位移测量装置边缘距桩靴边缘距离分别为 $0.25D$ 和 $0.50D$,试验测量插拔桩过程中土体水平位移随桩靴深度的变化,见图 6。图中负值为土体远离桩靴运动,正值为朝向桩靴方向运动。结果表明:随着桩靴逐渐插入土体中,产生位移的土体深度范围逐渐扩大,最大水平位置出现的位置逐渐下移;插桩过程中,0~0.4 m 深度内土体产生少量回淤;同一插桩深度下,土体最大水平位移产生的深度与桩靴所在土体深度接近。插桩深度达到 0.2 m 后,同一时刻最大土体位移基本出现在插桩深度处。随着桩靴与测量装置距离的增加,插桩深度相同时产生的最大土体位移逐渐减小。

工作阶段土体位移基本不变,将拔桩初始水平位移设置为参考 0 位,如图 6(c)和(d)所示,随着桩靴提升土体朝向桩靴运动,即此时桩靴带动周围土体产生一定量土体水平位移,与桩身弯矩变化相对应,最大桩

身弯矩出现深度与最大土体位移出现深度基本相同,两者的变化规律较为相似,也就是说土体位移变化直接影响桩身弯矩变化。结合图 6(a) 和 (b) 数据表明,试验结束后土体存在一定残余的位移,这也是试验完成后桩身存在弯矩的主要原因。

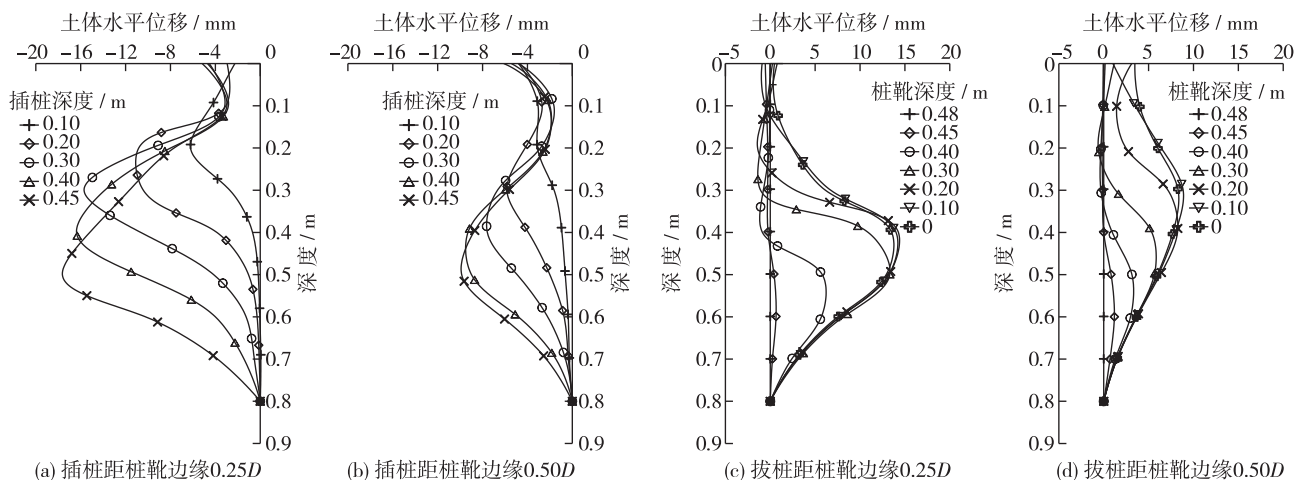


图 6 土体水平位移随桩靴深度变化

Fig. 6 Curves of lateral soil displacement distribution at different spudcan depths

2.3 插拔桩靴阻力

桩头水平位移是插拔桩过程中桩靴对邻近桩影响在土体表面的直观表现,在工程中表现为上部结构的水平位移。桩头水平位移随桩靴深度变化如图 7 所示。可见,随着插桩深度增加,桩头位移首先逐渐远离桩靴,当插桩深度达到 0.1 m 时,水平位移基本达到最大,随后桩头朝向相反方向运动,插桩结束时桩头水平位移与初始位置偏差很小;拔桩开始桩头逐渐向远离桩靴方向运动,达到一定值后向桩靴方向运动,拔桩阶段结束后桩头偏离初始位置较远;随着桩靴与邻近桩距离的增加,插拔过程中产生的桩头位移逐渐减小。

从图 8 可以看出,插桩过程中插桩阻力逐渐增大,由于土体强度沿深度方向强度变化比较均匀,每次试验中插桩阻力快速增加后趋于稳定,最终可以达到 1.47 kN 左右;拔桩阶段开始瞬间阻力由压力变成拉力,当拉力达到最大值后到达一稳定阶段,随后阻力逐渐降低,有的位置出现较小幅度的台阶式下降;桩靴到达一定位置后阻力瞬间下降,快速减小为 0。

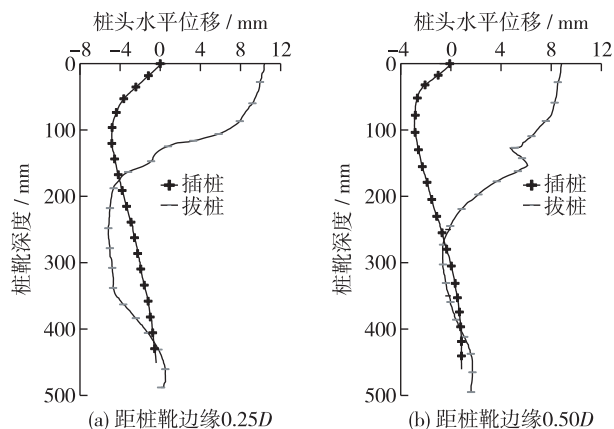


图 7 桩头水平位移随桩靴深度变化

Fig. 7 Curves of pile head displacement and spudcan depth

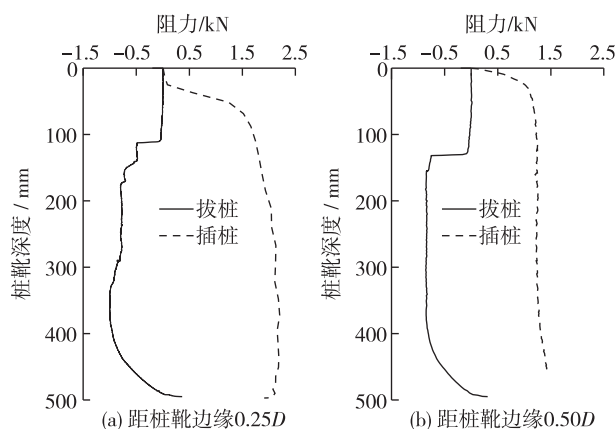


图 8 插拔桩阻力随桩靴深度变化

Fig. 8 Curves of spudcan resistance and spudcan depth

试验中可以观察到拔桩阻力突降为 0 时,桩靴底部已经和土体分离,桩头位移随桩靴深度变化曲线出现明显弯折,桩身弯矩也发生较大突变,邻近桩桩身响应在这一时刻产生了突变。通过分析拔桩阻力的变化,认为桩靴底部所能提供的吸附力及桩周土提供的摩擦力的合力由小到大再逐步减小至 0,其中桩靴底部和土体之间的吸力起着主导作用。拔桩的最大阻力为插桩过程中最大阻力的 $2/3$ 。

插桩过程中桩身各应变片测量弯矩值变化规律明显,拔桩过程中邻近桩距离桩靴边缘 $0.25D$ 试验中,应变片测量弯矩值有震荡,导致曲线变化并不平滑,但邻近桩距离桩靴边缘 $0.50D$ 试验中只在桩靴与土体分离时有较大突变,根据拔桩过程中测量桩靴阻力发现,若桩靴阻力有明显台阶式下降时,此时对弯矩即会产生明显震荡,该现象表明桩靴通过土体对邻近桩产生作用时,桩靴与土体的接触状态对邻近桩会产生较大影响。

3 结 语

随着插桩深度的增加,邻近桩桩身最大弯矩及最大土体水平位移产生的位置逐渐加深;拔桩过程中,由于土体向桩靴方向运动,土体位移逐渐恢复,桩身弯矩逐渐减小,但由于土体产生较大塑性变形,最终土体位移及桩身弯矩并未回到初始状态。这说明土体位移变化直接导致桩身响应变化,两者存在一定正相关性。

随着邻近桩与桩靴距离的增加,桩身弯矩、土体位移及桩头水平位移逐渐降低,桩靴对邻近桩的影响逐渐减小,由于试验次数相对较少,关于桩靴与邻近桩距离对试验的影响只能做出定性判断,该条件下插桩影响范围需要继续开展试验进行确定。

在插桩过程中桩头先向桩靴对侧运动,达到最大位移后朝向桩靴方向运动,拔桩过程桩头位移继续向桩靴方向移动,但最终并没有回到插桩前桩头的初始位置,桩身仍然存在残余弯矩,实际工程中应予以考虑。

插桩过程中插桩阻力逐渐增加,达到一定深度后逐渐稳定。拔桩过程中拔桩阻力先增大,达到最大值后一段时间保持基本稳定,随着桩靴底部与土体逐渐分离拔桩阻力突降,短时间内阻力变为 0,此时桩靴和土体之间的相互作用减小,桩靴对邻近桩的影响也随之减弱,此时刻后拔桩过程中桩身产生的负弯矩迅速变为正弯矩,并逐渐稳定。在实际拔桩过程中应对阻力的突然降低予以关注,避免因此造成失稳。

试验中对桩身弯矩、土体位移、水平位移及桩头水平位移测量方法进行了验证,并得出各物理量数据变化规律,就该试验来说,由于 $1g$ 试验的局限性,其试验结果对工程指导有限,但是该试验的意义主要在于为后续 $1g$ 模型试验和离心试验的开展提供一些可行的方法及数据基础,力争在离心试验中获得更多有价值的数据。

参 考 文 献:

- [1] TAN X M, GUO J Y, LU C. Effect of spudcan penetration on neighboring existing pile[C]//Proceedings of 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, 2006: 516-523.
- [2] 吴永初, 鲁晓兵. 桩靴贯入对固定平台基础扰动的数值模拟[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 呼和浩特, 2009: 118-122. (WU Yongren, LU Xiaobing. Numerical simulation of spudcan penetration disturbance to pile foundations of fixed platform[C]//The fourteenth China Marine (Offshore) Engineering Symposium. Huhehaote, 2009: 118-122. (in Chinese))
- [3] KELLEZI L, SUNDARARAJAN S. Spudcan-soil-jacket pile group foundation interaction during jack-up rig installation and removal[C]//14th International Jack-up Conference, 2013: 1-12.
- [4] THO K K, CHUN F L, CHOW Y K, et al. Eulerian finite element simulation of spudcan-pile interaction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6): 595-608.
- [5] HOSSAIN M S, HU Y, RANDOLPH M F, et al. Limiting cavity depth for spudcan foundations penetrating clay[J]. Géotechnique, 2005, 55(9): 679-690.
- [6] SPRINGMAN S M. Lateral loading on piles due to simulated embankment construction[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1989.

- [7] STEWART D P. Lateral loading of piled bridge abutments due to embankment construction[D]. Perth: University of Western Australia, 1992.
- [8] LEE C Y, POULOS H G, HULL T S. Effect of seafloor instability on offshore pile foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(5): 729-737.
- [9] 吴永韧, 鲁晓兵, 王淑云, 等. Spudcan 基础贯入对固定平台基础影响[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(1): 35-38. (WU Yongren, LU Xiaobing, WANG Shuyun, et al. Effects of spud-can on pile foundation of fixed platform[J]. China Offshore Platform, 2008, 23(1): 35-38. (in Chinese))
- [10] SICILIANO R J, HAMILTON J M, MURFF J D, et al. Effect of jackup spudcans on piles[C]//Offshore Technology Conf OTC Paper No 6467. Houston, USA, 1990.
- [11] CRAIG W H. Spud-can foundations: installation with deep penetration and subsequent removal[J]. Geotechnical Engineering, 2015, 131(3): 146-151.
- [12] XIE Y. Centrifuge model study onspudcan-plie interaction[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [13] 程星磊. 软黏土不排水循环弹塑性本构关系及其在海洋中锚固基础变形分析中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2014. (CHENG Xinglei. Undrained cyclic elastoplastic constitutive relation for soft clays and its application in the deformation analysis of marine anchor foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [14] 王越, 杨亮. 自升式钻井平台简论[J]. 船舶设计通讯, 2011(增刊1): 73-80. (WANG Yue, YANG Liang. Brief introduction on jack up drilling units[J]. Journal of Ship Design, 2011(Suppl1): 73-80. (in Chinese))

Scale model tests on effects of spudcan penetration and extraction on adjacent piles

TIAN Zhaofeng^{1,2}, WANG Jianhua^{1,2}, FAN Yifei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Geotechnical Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to evaluate the spudcan penetration and extraction effects on the adjacent piles, the free pile head model tests are carried out in clay under 1g conditions. The change laws of various physical quantities in the process are given by the model tests, and test data and testing methods for the subsequent centrifugal model tests are obtained. The model testing results show that when the spudcan penetrates deeper, the position where the maximum pile moment and the maximum soil displacement appear along the pile becomes deeper. As the spudcan elevates, the maximum pile moment and the maximum soil displacement decrease. However, after finishing of the model tests, the moment along the pile and the soil displacement do not return to their initial state. In the initial stage of the spudcan penetration, the resistance of the spudcan penetration increases rapidly and then gradually stabilizes. And the resistance of the spudcan extraction increases rapidly and then remains relatively stable during the initial stage of the spudcan extraction. When the spudcan shoe is about 120 mm away from the soil surface, the resistance suddenly drops to zero. The testing analysis results show that the displacement change of the soil mass directly leads to the change of the pile body response, and there is a positive correlation between them.

Key words: 1g model test; free head pile; spudcan; adjacent pile; spudcan penetration; spudcan extraction