

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.016

高维杰, 王建华, 田兆丰, 等. 砂土及黏土地地钻井船插桩对邻近桩的影响[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 111-119. (GAO Weijie, WANG Jianhua, TIAN Zhao Feng, et al. Influences of spudcan penetration and extraction on adjacent piles in sand and clay[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 111-119. (in Chinese))

砂土及黏土地地钻井船插桩对邻近桩的影响

高维杰^{1,2}, 王建华^{1,2}, 田兆丰^{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: 为研究黏土地地和砂土地地中桩靴贯入及拔出对邻近桩的影响,开展了2组在不同场地中进行插、拔桩靴的室内模型试验,分析了桩靴贯入、拔出过程中桩靴贯入阻力、拔出阻力、土体位移及桩身弯矩的变化规律。结果表明,黏土地地桩靴贯入阻力随桩靴贯入深度增加而增加,达到某一极限值后基本保持稳定;砂土地地桩靴贯入阻力随桩靴贯入深度呈线性增大。黏土地地中桩靴拔出阻力基本保持不变,在邻近泥面处突变,几乎减小为零;砂土地地中桩靴拔出阻力在初始阶段迅速增大然后迅速减小,达到最大值的一半后开始以一定的速率均匀减小,对比拔桩阻力的实测值与理论值,发现桩靴贯入土体后减小了土体强度。通过在土层中埋置土体位移测量装置,发现桩靴贯入在黏土地地的深度方向影响较大,砂土地地中则对水平方向影响较大;两种场地中均发生不同程度的回淤现象,且砂土地地更为明显。不同形式土体位移进一步导致不同的邻近桩响应,具体表现在黏土地地中桩身上部正弯矩较大,桩身下部负弯矩较小;在砂土地地中桩身上部正弯矩较小,桩身下部负弯矩较大;插桩过程中最大桩身弯矩逐渐增大,且发生位置逐渐下移,当桩靴贯入到一定深度后最大桩身弯矩基本保持不变;拔桩过程中砂土地地的邻近桩响应不明显,桩身弯矩出现轻微减小。研究结果可为钻井船平台桩靴计算竖向承载力和抗拔极限力提供依据,同时为评价不同场地中桩身响应提供技术参考。

关 键 词: 钻井船; 桩; 桩靴贯入; 黏土; 砂土

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)05-0111-09

钻井船是海洋石油开采工程中的重要工具。自升式钻井船工作时依靠桩靴贯入海床中提供竖向支撑力和水平抵抗力,桩靴贯入及拔出过程中会排开大量土体,对周围土体扰动特别大。然而钻井船工作时附近可能有海洋桩平台,钻井船桩靴贯入及拔出产生的土体位移会挤压桩基础,使桩挠曲、倾斜甚至失稳,对临近桩平台产生不利影响。因此有必要对钻井船桩靴在不同场地中贯入及拔出对邻近桩的影响进行研究。

针对钻井船插拔桩对邻近桩的影响,国内外学者开展了一些研究。Siciliano等^[1]针对钻井船在正常固结软黏土地地插桩问题进行了100g条件下的离心模型试验,分析了不同桩靴与邻近桩间距时桩靴贯入对邻近桩的影响,并通过梁-柱模型建立邻近桩与周围土体的相互作用关系,根据桩身弯矩对桩靴贯入产生的土体位移进行了反分析。Craig^[2]针对钻井船在黏土上覆盖砂土地地中的插桩问题也进行了100g条件下的离心模型试验,分析插桩过程对邻近桩水平承载力的影响。Stewart^[3]针对自升式钻井平台插拔桩后邻近桩受到横向荷载的情况,分析不同强度黏土中桩靴贯入过程对邻近桩水平承载特性产生的影响,为研究不同强度土层中的桩身响应提供参考依据。以上工作虽然对黏土地地中插、拔桩靴对邻近桩的影响进行了一定研究,但没有研究桩靴对周围土体的影响。Xie^[4]在软黏土地地和砂土上覆盖黏土的场地中进行100g条件下的离心模型试验,利用PIV技术揭示了周围土体变形机理。田兆丰^[5]通过实验室自行研发的土体位移测量装置

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579174)

作者简介: 高维杰(1992—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事海洋土力学研究。E-mail: gaoweijie@163.com

通信作者: 王建华(E-mail: tdwjh@eyou.cn)

测得特定位置处土体位移也为两段法计算提供试验数据。以上研究大部分是关于黏土地和黏土上方或下方铺设砂土的场地中插拔桩对邻近桩影响的研究。吴永韧等^[6]通过 1 g 条件下的模型试验,分析了饱和粉砂地基中桩靴贯入对临近平台桩基础的影响;尽管他对粉砂场地中桩靴贯入对邻近桩的影响进行研究分析,但对邻近桩响应的介绍较少。

综上所述,目前钻井船插拔桩对邻近桩影响的研究主要针对某单一土层场地或者混合成层土场地进行研究,虽然对于不同场地插拔桩对邻近桩的影响已有了一定认识,但仍然缺少系统的比较和研究。针对上述问题本文分别在黏土和砂土场地中进行了插、拔桩试验,分析研究不同场地中钻井船插桩对邻近桩的影响,以及不同工作场地中钻井船插、拔桩阻力对邻近桩影响的规律。

1 模型试验概况

模型试验具体过程:①制备试验土体,并安装邻近桩及土体位移测量装置;②测量试验土体土性参数;③试验中保持桩靴贯入速率为 0.1 mm/s,贯入到预定位置为止(黏土场地中桩靴贯入深度 $d_c=0.45$ m,砂土场地中桩靴贯入深度 $d_s=0.15$ m);④切换伺服加载装置,对桩靴施加恒定的力,模拟钻井船工作过程;⑤拔桩过程中桩靴上拔速度为 0.1 mm/s,桩靴拔出泥面后停止。

1.1 模型参数及土层

模型试验桩靴原型直径 $D_p=18$ m,为减小边界效应的影响,使试验结果更加准确,确定模型试验尺寸相比 $N=100$,即模型桩靴直径 $D=18$ cm。桩基础竖向承载力主要由桩端阻力(端承桩)和桩身摩擦阻力(摩擦桩)两方面提供,为增加摩擦阻力一般加长桩基础,按照相对刚度分类,属于柔性桩^[7],根据邻近桩模型的尺寸形状,选用铝合金圆管,邻近桩模型具体参数为内径 10.0 mm,外径 12.3 mm,桩长 1.1 m,弹性模量为 70 GPa,截面惯性矩 526.7 mm⁴。邻近桩模型入土 0.9 m,沿桩身布置 9 对应变片测量桩身弯矩,1 号应变片布置在距离桩尖 0.1 m 处,9 号应变片在土面处,两对应变片之间间隔 0.1 m。

土体位移测量装置由实验室自行设计制作,装置共 10 段,底端固定,中间 8 段为测量单元,顶端是信号集成端及接口。试验所用场地土体厚 0.9 m,具体物理力学参数指标见表 1。

表 1 场地土体物理力学参数指标

Tab. 1 Parameter index of physical and mechanical properties of clay

场地	含水率/%	天然重度/ (kN·m ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	场地	干密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/%	孔隙比	内摩擦角/°
黏土	42	17.88	44.44	27.01	17.43	砂土	1.681	17.8	0.426	41

用分层击实法现场制备砂土土层。土层厚 0.9 m,每层 0.1 m,分 9 层填装砂土,每层划分均匀的 7 块,每块装土 190 kg,每层装土完成后将土整平,用击实锤击实达到预定厚度。

对黏土地进行电动十字板剪切试验,测点位置如图 1 所示。测试结果(图 2)表明,该试验土层不排水抗剪强度随土体深度略有增加,土体抗剪强度随土体深度变化的拟合函数为:

$$S_u = 5.8 + 2.75d_1 \quad (1)$$

式中: S_u 为土体不排水抗剪强度(kPa); d_1 为土体深度(m)。

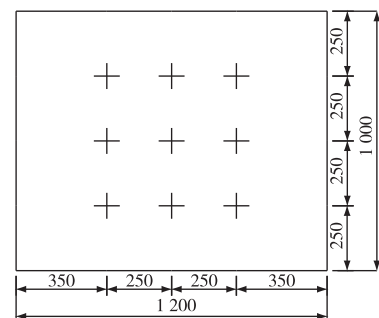


图 1 电动十字板剪切试验测点(单位:mm)

Fig. 1 Testing points for monitoring undrained shear strength (unit: mm)

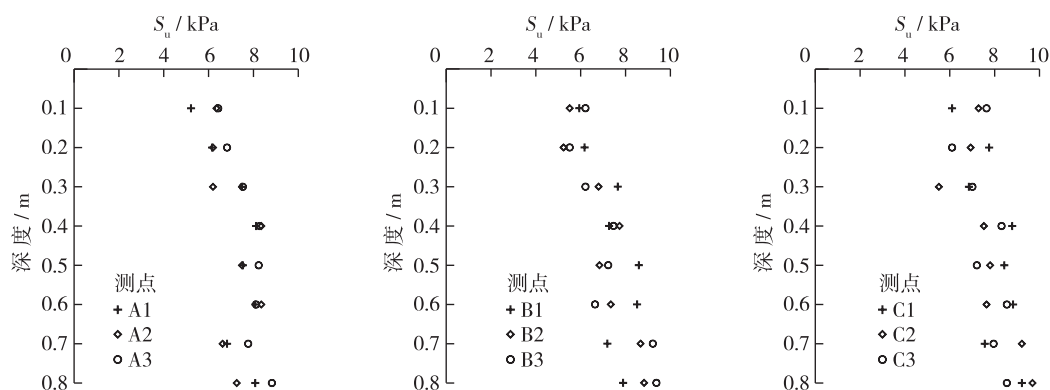


图2 不同位置测点处不排水抗剪强度

Fig. 2 Undrained shear strength of different monitoring points

1.2 试验布置

试验过程中邻近桩桩头完全自由,即不约束桩头的位移和转角。在距离邻近桩 $0.5D$ (D 表示桩靴直径,本试验的桩靴直径为 18 cm) 位置以 0.1 mm/s 速度进行插桩和拔桩。邻近桩及土体位移测量装置分别安装在桩靴两侧,距离桩靴边缘 $0.5D$ (见图 3 和 4)。伺服电动缸通过反力架与模型箱相连,并由它带动桩靴以 0.1 mm/s 的速度贯入及拔出,为了测量桩靴贯入阻力及拔出抗力,桩靴与电动缸推杆之间由力传感器连接。为准确测量桩靴在土体以下的深度,安装 1 个 55 cm 量程的位移传感器。在桩的研究中,桩头位移十分重要,可以简化认为是桩身位移的外在表现,所以桩头处需要通过机电百分表测量桩头位移。

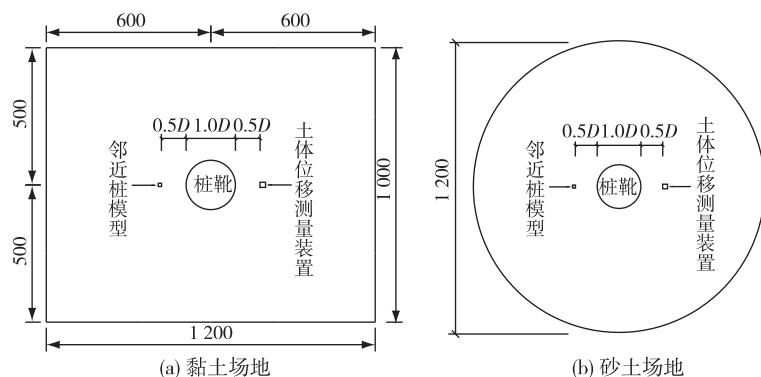


图3 试验平面布置(单位: mm)

Fig. 3 Plan layout of model tests (unit: mm)

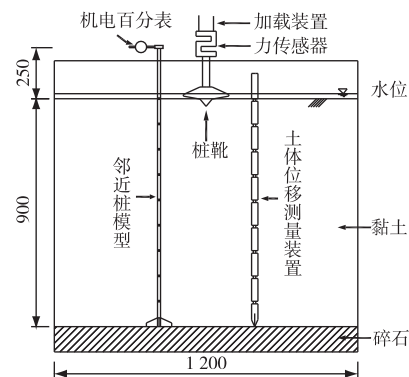


图4 试验设备剖面(单位: mm)

Fig. 4 Profile of model tests (unit: mm)

2 试验结果与分析

2.1 插桩及拔桩阻力

图 5 为桩靴贯入阻力随插桩深度变化曲线。试验结果表明,在黏土地桩靴贯入过程中,当桩靴贯入 0.1 m 深(约为 $0.5D$)后插桩阻力基本稳定,最大插桩阻力和桩靴尺寸与黏土的物性指标密切相关;而在砂土地桩靴贯入过程中,桩靴贯入阻力曲线是一条光滑的折线,转折点在 0.02 m 深度处(约为 $0.1D$),两条直线的不同斜率表示插桩阻力不同的变化速率,转折点之前的插桩阻力变化速率较小,转折点之后的插桩阻力变化速率较大。砂土地场的桩靴贯入阻力整体上随深度呈线性增大。

SNAME 认为插桩阻力可以看成是土体竖向极限承载力考虑土体回淤和桩靴替换部分土体^[8]。从试验现象中发现,砂土地场中贯入桩靴,插桩坑出现部分回淤,回淤土体的深度约为插桩坑高度的一半。砂土地

地的最大桩靴贯入阻力计算式为:

$$F = F_V - F'_0 A + \gamma' V \quad (2)$$

$$F_V = (0.5\gamma' B N_\gamma s_\gamma d_\gamma + p'_0 N_q s_q d_q) A \quad (3)$$

式中: F_V 为极限竖向承载力(kN); F'_0 为回淤土体上覆有效压力(kPa); V 为桩靴体积(m^3); γ' 为土体有效重度(kN/m^3); B 为桩靴宽度, 圆形桩靴的直径(m); A 为桩靴面积(m^2); p'_0 为桩靴最大直径处的上覆有效压力(kPa); N_γ 和 N_q 为强度影响系数, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\phi$, ϕ 为砂土内摩擦角, $N_q = e^{\pi \tan\phi} \tan^2(45^\circ + \phi/2)$; s_γ 和 s_q 为形状影响系数, $s_\gamma = 1 - 0.4(B/L)$, 圆形桩靴取值 0.6; $s_q = 1 + (B/L)\tan\phi$; d_γ 和 d_q 为深度影响系数, d_γ 取值为 1, 当 $D/B \leq 1$ 时, $d_q = 1 + 2\tan\phi(1 - \sin\phi)^2 D/B$; 当 $D/B > 1$ 时, $d_q = 1 + 2\tan\phi(1 - \sin\phi)^2 \arctan(D/B)$ 。

图 6 是桩靴贯入阻力实测值和由式(2)得到的计算值随插桩深度变化的曲线。从图 6 可见, 桩靴贯入阻力变化曲线存在一个转折点, 转折点以前桩靴贯入阻力变化速率较慢, 转折点以后桩靴贯入阻力变化速率较快, 这与 SNAME 计算式(2)得到的结果基本一致。

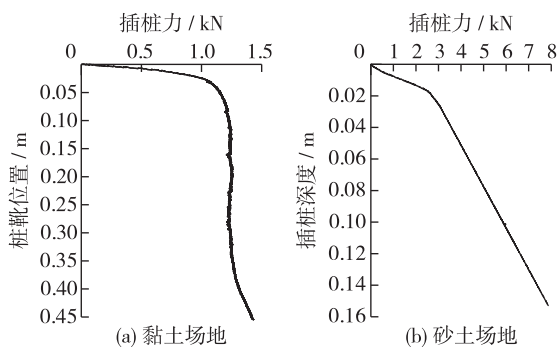


图 5 桩靴贯入阻力

Fig. 5 Resistance of spudcan penetration

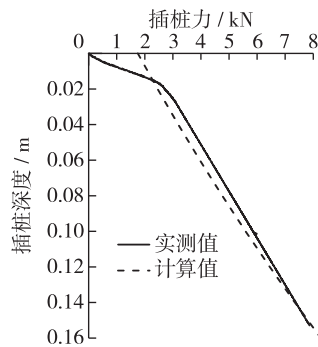


图 6 砂土地桩靴贯入阻力实测值和计算值

Fig. 6 Measured and calculated values of penetration resistance of spudcan in sand

图 7 是拔桩阻力随拔桩深度变化的曲线。从图 7 可见, 黏土地地拔桩在初始阶段拔桩力迅速增加, 当桩靴拔出 $1D$ 后拔桩阻力基本稳定, 当桩靴距离土面 0.12 m 处, 拔桩阻力迅速变小并趋于零, 从试验中可以看出, 此时桩靴和土完全分离; 砂土地地中拔桩阻力初始阶段会迅速增大, 达到峰值后又迅速减小, 当减小到一定程度后变化速率减缓。和黏土地地的拔桩相比较, 砂土地地中拔桩阻力在初期变化最剧烈, 后期较为稳定; 而黏土地地的拔桩过程则相反。

Purwana^[9]对黏土地地中拔桩的研究表明, 拔桩阻力有很大一部分由桩底吸力贡献。分析拔桩阻力的变化, 表明在该拔桩速率下, 桩靴底部所能提供的吸力及桩周土提供的摩擦力的合力是一个由小到大随后突降为 0 的过程, 其中桩靴底部和土体之间的吸力起主导作用。

砂土地地中的拔桩阻力曲线在初期(桩靴从 0.16 m 到 0.15 m)增长迅速, 达到峰值; 在中期(桩靴从 0.15 m 到 0.13 m)迅速减小, 减到峰值的 50%; 在后期(桩靴从 0.13 m 到完全拔出过程)基本保持线性减少趋势, 直至减小到零。

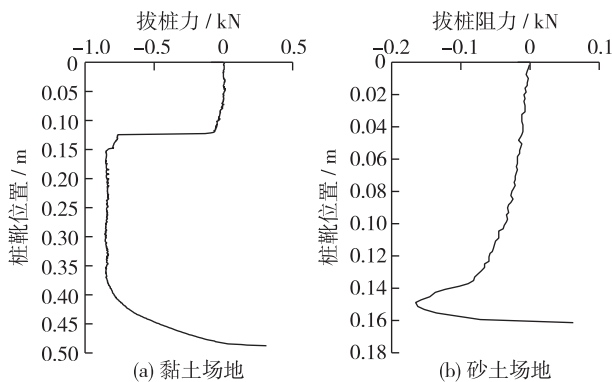


图 7 桩靴拔出阻力

Fig. 7 Resistance of spudcan extraction in clay and sand

Meyerhof 和 Adams 在试验中发现砂土地地中拔桩的土体破坏面呈圆台形状,将此破坏面简化为圆柱形滑动剪切面,通过竖向剪切面土压力影响系数 K_u 将两者联系起来,并提出一个半经验式计算拔桩极限承载力 P_u [10]。

$$P_u = W + \pi Dcl + \frac{\pi}{2} S_r D \gamma' l^2 K_u \tan \phi, \quad L \leq H \quad (4)$$

$$P_u = W + \pi Dcl + \frac{\pi}{2} S_r D \gamma' (2l - H) H K_u \tan \phi, \quad L > H \quad (5)$$

式中: W 为桩靴上部土体重量, $W = \pi D \gamma l$; K_u 为竖向剪切面土压力影响系数, $K_u = 0.496 \phi$; S_r 为被动土压力形状影响系数, $S_r = 1 + ml/D$, 系数 m 在表 2 中选取。

Meyerhof-Adams 经验式在初始时刻认为桩靴上部泥面齐平,与试验过程中拔桩初始状态吻合,通过 Meyerhof-Adams 法计算得到桩靴上拔阻力的理论值(见图 8)。从图 8 可见,当砂土内摩擦角按照试验前的参数取 41° 时计算得到的值比实测值偏大,当内摩擦角取 25° 时,理论值和实测值吻合较好。这可能是由于该部分土体是周围土体回淤后产生的,相比试验前制备的密实土体,这部分土体是松散的。经过扰动,土体发生了弱化,其物性参数发生改变。桩靴在 $0.14 \sim 0.16$ m 位置时,桩靴上拔阻力实测值明显大于理论值,此时应该存在其他的影响因素,例如桩靴与下部土体的黏聚力,针对此问题没有开展进一步研究。

对比黏土地地和砂土地地中的插、拔桩阻力发现:①插桩过程中,在两种不同场地桩靴贯入相同深度时,桩靴贯入阻力值的大小相差悬殊,在桩靴贯入 0.15 m 深时,黏土地地的桩靴贯入阻力是砂土地地的 16.4% ,因此桩靴在不同场地中的相同深度,砂土地地可以提供更大的承载力;②拔桩过程中,在黏土地地的拔桩阻力最大值是砂土地地的 5 倍,因此砂土地地中拔桩可以较为轻松地完成,而在黏土地地中需要更加详细的论证和研究;③黏土地地中拔桩阻力最大值是插桩阻力最大值的 66.5% ,砂土地地中拔桩阻力最大值是插桩阻力最大值的 2.1% 。

2.2 土体位移

桩靴直接作用于土体,插、拔桩过程中对周围土体扰动非常剧烈,造成土体水平方向的移动。试验过程中发现,桩靴贯入过程中,黏土土体回淤不明显,砂土土体出现部分回淤,模型桩靴被砂土覆盖;桩靴拔出过程中,黏土土体部分回淤,砂土土体回淤明显,插桩坑基本不可见。图 9 和 10 分别给出了插桩和拔桩过程中距离桩靴边缘 $0.5D$ 处的黏土及砂土土体水平位移场。

图 9(a) 和图 10(a) 是桩靴贯入过程中邻近桩周围土体的水平运动,从图中可以看出,桩靴贯入造成桩靴周围土体向远离桩靴的方向运动,随着桩靴向下贯入,发生最大土体水平位移处逐渐下移,且发生在桩靴水平位置深度处;桩靴水平位置以上的土体表现为运动减缓、停滞甚至回淤的现象,此时土体处于卸载状态。图 9(b) 和图 10(b) 显示的是桩靴拔出过程中邻近桩周围土体的水平运动,从图中可以看出,桩靴拔出使邻近桩附近土体向桩靴方向运动,虽然拔桩过程初始条件不同,但是可以看出桩靴从 0.15 m 上拔至泥面处,黏土土体运动变化更为明显。

图 11 是桩靴贯入深度 $0 \leq d \leq 0.15$ m 过程中土体水平位移在各个时刻的比较。由图可知,在泥面处的

表 2 系数 m 参考值

Tab. 2 Reference values of m

内摩擦角 $\phi/^\circ$	20	25	30	35	40	45	48
系数 m	0.05	0.10	0.15	0.25	0.35	0.50	0.60

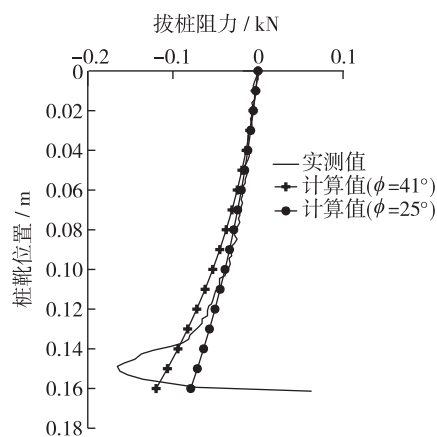


图 8 砂土地地桩靴上拔阻力计算值和实测值

Fig. 8 Measured and calculated values of resistance of spudcan extraction in sand

土体位移非常相似,基本为 2~5 mm,但随着深度加深,变化规律表现不同。在黏土地中当插桩深度小于 0.1 m 时,最大土体位移发生在泥面处,当插桩深度大于 0.1 m 时,最大土体位移发生在桩靴水平位置处;而在砂土地中,最大土体位移基本发生在桩靴水平位置处。比较桩靴贯入 0.15 m 时刻的土体水平位移,发现砂土地的最大土体水平位移比黏土地的最大土体水平位移大,约是黏土地的 1.6 倍,说明桩靴贯入在砂土地的水平方向上影响较大;在桩靴贯入深度 $0 \leq d \leq 0.15$ m 过程中,砂土地 0.5 m 深度以下土体基本没有发生变化,而在黏土地则发生了更加明显的变化,特别是 $d=0.12$ m 及以后的过程,由此可见桩靴贯入在黏土地的垂直方向上影响大。

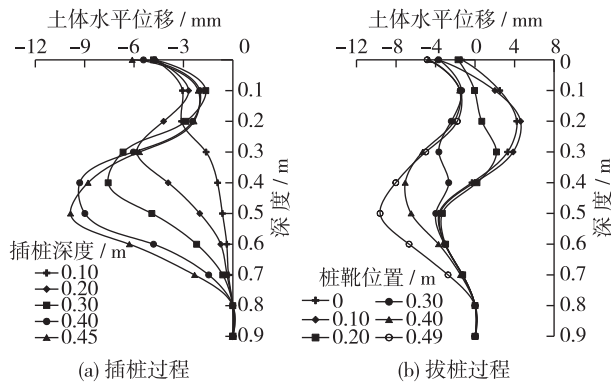


图 9 黏土地中土体水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of soil mass in clay

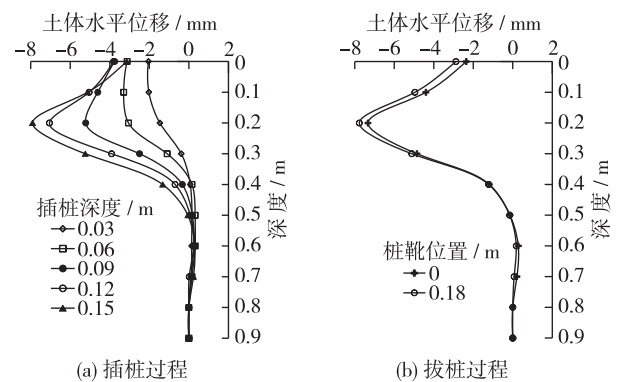
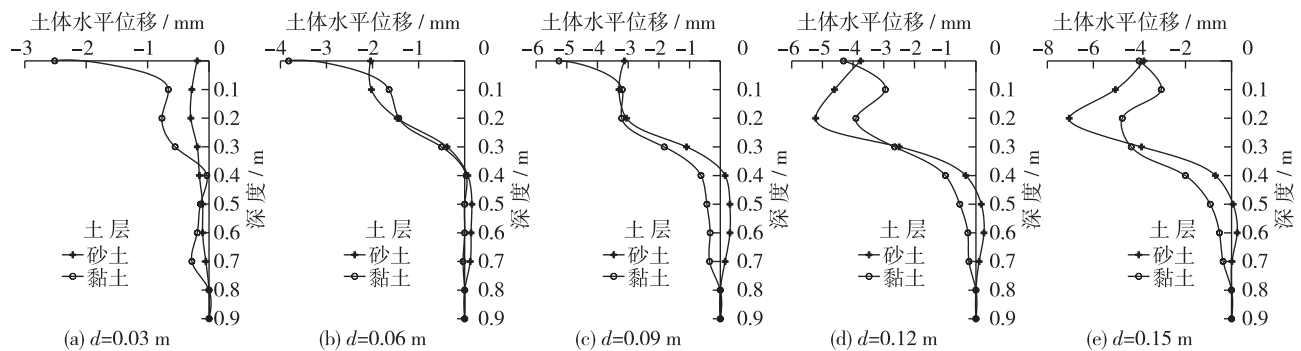


图 10 砂土地中土体水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of soil mass in sand

图 11 插桩过程中土体水平位移 ($0 \leq d \leq 0.15$ m)Fig. 11 Horizontal displacement of soil mass during spudcan penetration ($0 \leq d \leq 0.15$ m)

2.3 桩身弯矩

土体运动会挤压邻近桩,使邻近桩受力产生弯曲和移动,从而影响邻近桩的安全。图 12 给出了插、拔桩过程中的桩身弯矩分布,规定桩靴一侧受拉为正受压为负。从图 12 可以看出,插桩初期,沿桩身都是负弯矩,表示桩靴一侧受拉,此时桩靴排开泥面处土体,土体挤压邻近桩上部,使邻近桩向远离桩靴的方向弯曲。随着桩靴贯入深度增加,负弯矩最大处逐渐下移,并且数值逐渐增大,上部逐渐出现正弯矩,正弯矩的发展趋势和负弯矩基本相同,最大弯矩处逐渐下移,且数值逐渐增大。拔桩过程中,黏土地中桩身弯矩变化比较明显,最大桩身弯矩减小,0.5 m(拔桩初始时刻桩靴位置)以下桩身弯矩随着桩靴上拔逐渐减小,此时土体受桩身拔出影响产生回淤,土体对邻近桩卸载;砂土地中桩身弯矩变化不明显,从初始时刻和结束时刻可以看出桩身弯矩减小。

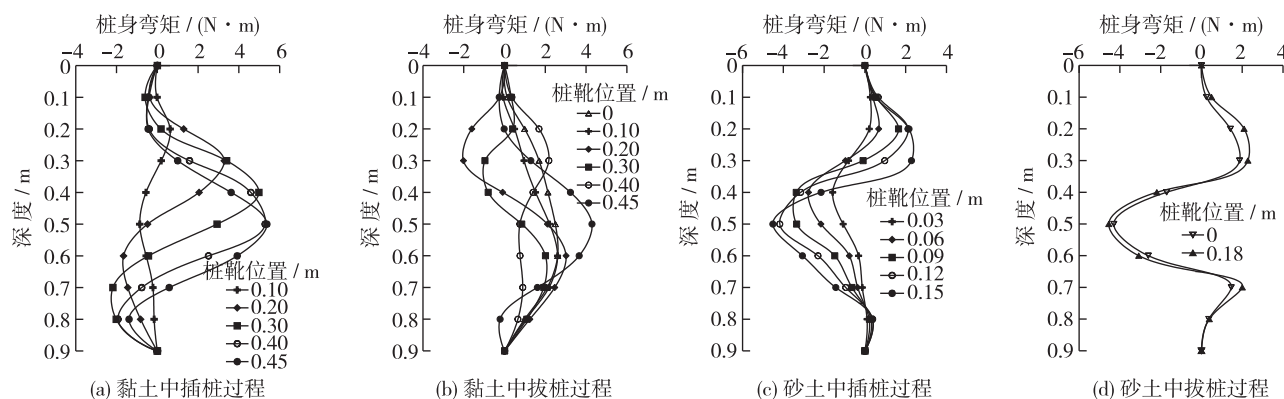


图12 黏土和砂土地中桩身弯矩

Fig. 12 Bending moment of pile shaft during spudcan penetration and extraction in clay and sand

黏土地中最大负弯矩是最大正弯矩的75%,砂土地中的最大负弯矩是最大正弯矩的2倍。上文中已经证明插桩对砂土地有很大扰动,使上部土体弱化,因此在砂土地中插桩时,桩靴上部土体弱化,对邻近桩的支持力减弱,下部土体被挤密增强了邻近桩的水平承载力,与文献[11-13]的研究结果一致。此时出现负弯矩大于正弯矩的现象,在黏土地中没有这种现象。

在同一种场地中,桩身最大弯矩发生在桩靴贯入阶段,分析插桩过程中桩身最大弯矩发生的时刻,并预测桩身最大弯矩随桩靴贯入的变化规律(图13)。从图13可见,两种场地中最大桩身弯矩均随桩靴贯入深度增加逐渐增大,并且在桩靴贯入0.3 m深(约1.67D)后,最大桩身弯矩变化减缓甚至基本保持不变,此时桩达到最危险状态。

图14给出了钻井船插桩过程中的桩头水平位移。从图14可见,砂土地中插桩造成的桩头水平位移明显大于黏土地,前者约为后者的3.7倍。此时桩尖位置不变,砂土地中的邻近单桩比黏土地地的更加倾斜,也更不利于邻近桩平台的安全使用。另外,当桩靴贯入0.09 m(0.5D)深时,桩头水平位移基本达到最大值,之后开始缓慢减小;而砂土地的桩头水平位移曲线开始时增速较快,然后逐渐减缓,最后基本趋于平稳。

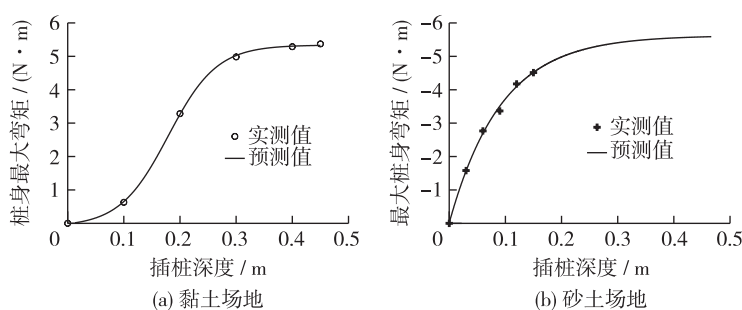


图13 最大桩身弯矩

Fig. 13 Maximum bending moment of pile along with depth of spudcan penetration

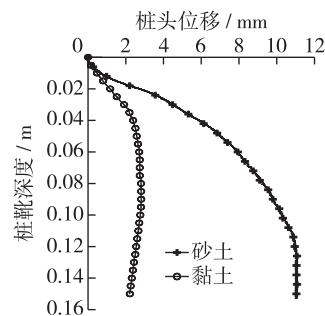


图14 桩头水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of pile head

3 结 语

(1) 桩靴贯入相同深度,砂土地可以提供更大承载力;拔桩过程中,黏土地更加难以拔出,需要较大拔桩力。砂土是钻井船工作的最佳场地。

(2)在软黏土地中插桩,桩靴对土体强度影响较小;在密实砂土地中,桩靴使其上部土体软化,强度减小。

(3)桩靴对土体的影响方向存在差异,桩靴贯入在砂土地的水平方向上影响较广,在黏土地垂直方向上影响更深。

(4)插桩相同深度,在黏土地中最大弯矩发生在桩靴最大直径处,而在砂土地中发生在邻近桩下部,最大桩身弯矩随着插桩深度增大而增加,但是当桩靴贯入到一定深度后,最大桩身弯矩基本保持不变。

(5)桩靴贯入过程中,桩头位移在黏土地中的数值较小,并且在远离桩靴达到最大值后又逐渐减小,有向桩靴方向移动的趋势;而在砂土地中数值较大,在远离桩靴方向上逐渐增大,然后基本稳定。

参 考 文 献:

- [1] SICILIANO R J, HAMILTON J M, MURFF J D, et al. Effect of jack-up spudcans on piles[J]. Offshore Technology Conference, 1990, OTC 6467.
- [2] CRAIG W H. Spud-can foundations: Installation with deep penetration and subsequent removal[J]. Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 1998, 131(3): 146-151.
- [3] STEWART D P. Influence of jack-up operation adjacent to a piled structure[J]. Proceeding International Symposium Frontiers in Offshore Geotechnics, 2005: 543-549.
- [4] XIE Y. Centrifuge model study on spudcan-pile interaction[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [5] 田兆丰. 钻井船插、拔桩对邻近桩影响的模型试验[D]. 天津:天津大学, 2017. (TIAN Zhaofeng. Model tests on effects of spudcan penetration and extraction on adjacent piles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] JTJ 254—98 港口工程桩基规范[S]. (JTJ 254—98 Code for pile foundation in port engineering[S]. (in Chinese))
- [8] SNAME. Recommended practice for site specific assessment of mobile jack-up units[S]. Society of Naval Architects and Marine Engineers. Technical and Research Bulletin 5-5A. New Jersey, 2007.
- [9] PURWANA O A. Centrifuge model study on spudcan extraction in soft clay [D]. Singapore: National University of Singapore, 2007.
- [10] MEYERHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4): 225-244.
- [11] 张其一. 自升式平台桩基土体变形规律与破坏机理分析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(11): 111-116. (ZHANG Qiyi. Analysis of deformation law and failure mechanism of pile foundation of jack-up platform[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(11): 111-116. (in Chinese))
- [12] 陶常飞. 曹妃甸浅滩海洋工程地质特征及插桩深度研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. (TAO Changfei. Research on the characteristics of marine engineering geology and the depth of pile penetration in Caofeidian Shoal[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese))
- [13] 王琦. 自升式平台插桩物理模型试验及分析[J]. 中国水运, 2014, 14(3): 364-366. (WANG Qi. Model test and analysis of jack-up platform penetration[J]. China Water Transport, 2014, 14(3): 364-366. (in Chinese))

Influences of spudcan penetration and extraction on adjacent piles in sand and clay

GAO Weijie^{1,2}, WANG Jianhua^{1,2}, TIAN Zhaofeng^{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: Two 1g model tests in the laboratory are carried out to investigate the influences of the spudcan penetration and extraction on the adjacent piles in the sand and clay. The variations of the spudcan penetration and extraction resistance, the soil displacement and the pile shaft bending moment distributions during the spudcan penetration and extraction are analyzed in this study. It is found that the penetration resistance of the spudcan in the clay initially increases with the increase of the spudcan penetration depth and then gradually keeps stable after reaching a certain limit value, while in the sand it keeps linear increasing with the penetration depth. The extraction resistance in the clay keeps constant until the spudcan is lifted near the soil surface, where it drops to zero. In the sand, the spudcan extraction resistance rapidly increases at the initial stage, and then decreases rapidly. After reaching the maximum value, it begins to uniformly decrease at a certain rate. A comparison between the calculated and the measured values of the spudcan resistance indicates that the soil strength is weakened by the spudcan penetration into the soil mass. It is found from soil mass displacement measuring system that the spudcan in the clay has a greater influence in the vertical direction and has a greater influence in the horizontal direction in the sand. And there are different degrees of the back-siltation at both sand and clay sites, and at the sand site the back-siltation is more obvious. Different soil movement distributions lead to different responses of the adjacent pile: in the clay, the positive bending moment in the upper part of the pile shaft is larger, and the negative bending moment of the lower part of the pile shaft is smaller. And the positive bending moment in the upper part of the pile shaft in the sand is smaller and the negative bending moment in the lower part of the pile shaft is larger. In the process of pile penetration, the maximum bending moment along the pile shaft gradually increases with the spudcan penetration and its position moves downwards at the same time. When the spudcan penetrates to a certain depth, the maximum bending moment remains basically unchanged. However, the adjacent pile only displays a slight decrease in its bending moment during the spudcan extraction. The research results given by this paper can provide a reference for the calculating vertical bearing capacity and ultimate uplift force of the spudcan of the drilling ship platform, and a reference for evaluating the pile shaft response in different soil masses.

Key words: drilling platform; pile; spudcan penetration; clay; sand