

DOI: 10.11779/CJGE20211441

倾斜拉拔荷载下锚桩承载性能及桩周位移场可视化 离心模型试验

王忠涛¹, 罗光宇¹, 孔纲强^{*2}, 张宇³, 范致贤¹, 杨庆¹

(1. 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; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 大连交通大学土木工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 单点系泊系统作为一种新型锚固系统获得越来越多的应用, 然而倾斜拉拔荷载下单点系泊锚桩的承载性能及桩周土体变形机理尚不明确。基于人工合成透明土材料搭建了可视化离心模型试验系统, 对倾斜拉拔荷载下锚桩的力学响应展开离心模型试验, 探讨加载角度对锚桩承载力、失效模式和桩周土位移场的影响规律, 并与 1g 条件下透明土模型试验结果进行定性的对比分析。研究结果表明, 开展的基于透明砂土的离心模型试验, 可以用于评估现场应力状态下锚桩的承载特性与失效机理、土体内部位移场; 桩周土体的位移量沿深度方向差别相对较为明显, 锚眼附近的土体位移相对较大; 1g 条件下土体位移场无法合理反映位移沿桩身方向的变化规律, 极限荷载下桩侧土体的变形量小于离心模型试验中的土体变形量。

关键词: 锚桩; 透明土; 倾斜拉拔荷载; 土体位移场; 离心模型试验

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)01-0189-07

作者简介: 王忠涛(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土力学基本理论和试验方面的研究工作。E-mail: zhongtao@dlut.edu.cn。

Visual centrifugal model tests on capacity of anchor piles and displacement field around piles under oblique pull-out loads

WANG Zhongtao¹, LUO Guangyu¹, KONG Gangqiang², ZHANG Yu³, FAN Zhixian¹, YANG Qing¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China; 3. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The single-point mooring systems have been increasingly used as a new anchorage system. However, the capacity of anchor piles for single-point mooring and the deformation mechanism of soils around the piles under oblique pull-out loads are still unclear. Based on synthetic transparent sand, a visual centrifugal model test system is established to carry out the centrifugal model tests on the mechanical behaviors of the anchor piles under oblique pull-out loads. The effects of loading angle on the pulling resistance, failure mode and soil displacement field are discussed, and the model test results of the transparent sand under 1g condition are also qualitatively compared. The results illustrate that the centrifugal model tests on the transparent sand can be used to evaluate the pulling capacity and failure mechanism of the anchor piles and the internal displacement field of soils under the real stress state. The difference of displacement value of the surrounding soil with depth is obvious, and the relative large soil displacement occurs near the pad eye. The soil displacement field under 1g condition cannot rationally reflect the variation laws of soil displacement along the anchor piles, and the soil deformation value at the pile side under the ultimate resistance is less than that in the centrifugal model tests.

Key words: anchor pile; transparent soil; oblique pull-out load; soil displacement field; centrifugal model test

0 引言

单点系泊系统通过旋转轴承能够使浮式平台(如 floating production storage and offloading, FPSO)在风、

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772296, 51639002)

收稿日期: 2021-11-27

*通信作者(gqkong1@163.com)

浪、流作用下进行 360° 自由旋转, 从而保持在环境荷载最小的方位, 多应用于气候多变、海况较差的水域。单点系泊系统的锚桩一般埋设在海床泥面下一定深度以抵抗系泊链传来的倾斜拉拔荷载。很多学者对倾斜拉拔荷载下桩的承载能力进行了研究。Cardoso 等^[1]和 Huang 等^[2]通过离心模型试验重点分析了拉拔角度对桩基极限承载力的影响, 试验中桩基的受力点布置在桩顶, 但实际单点系泊系统锚桩的受力点往往设置在一定桩深的桩体侧壁。Peng 等^[3]针对倾斜荷载作用于锚桩最优加载点的情况, 根据极限平衡方程和最小外力原则提出了锚桩抗拔承载力的解析解。Ramadan 等^[4-5]对密砂中的锚桩开展离心模型试验和 ABAQUS 数值模拟, 得到了不同加载角度下的荷载-位移曲线。锚桩的承载性能取决于桩-土间的相互作用, 但常规的技术手段难以准确测量桩周土体的内部位移场, 影响了桩周土体的变形破坏机理分析和锚桩承载力计算公式的提出。

近年来, 透明土材料和 PIV (particle image velocimetry) 技术的结合使土体的内部变形可视化问题得到有效解决。Ni 等^[6]、Qi 等^[7]和 Sang 等^[8]分别研究了桩基贯入引起的桩周土体位移场问题。周东等^[9]以被动桩为研究对象, 获得了侧向位移作用下桩侧土体在不同深度的内部位移场。Cao 等^[10]和 Kong 等^[11]研究了拉拔荷载下桩的力学响应, 实现了土体内部变形的可视化。然而, 上述常规 $1g$ 模型试验无法反映现场条件的应力水平, 而离心模型试验通过施加离心加速度弥补了土体缩尺造成的应力损失, 使模型的应力状态与原型相同^[12]。Song 等^[13]最早将透明土材料运用到土工离心机试验系统中, 所用透明土由无定型硅粉、石蜡溶剂和白油配制而成, 其物理力学性质与低塑性黏土较为相似^[14], 光学透明性局限在 8 cm 左右^[15], 通过相机记录了拉拔过程中平板锚的运动轨迹, 但没有定量分析土体的位移。Black^[16]采用与 Song 等^[13]相同的透明土材料, 将透明土和激光成像系统置于离心环境中, 通过条形基础沉降的离心模型试验得到土体在离心应力水平下的应变云图。总体上, 在离心机中采用透明土和 PIV 技术开展的模型试验成果较少, 尤其是针对较为复杂荷载作用下如锚桩运动造成桩周土体发生大变形的工程问题模拟更不多见。

本文搭建透明砂土和 PIV 技术的离心模型试验系统, 测量倾斜拉拔荷载下锚桩的荷载-位移响应, 获得极限承载力和周围土体的内部位移场, 并对比 $1g$ 条件下透明土模型试验结果, 探讨离心状态或缩尺应力场对土体位移场的影响规律, 以期为单点系泊系统的锚桩设计提供技术支撑。

1 模型试验简介

1.1 依托工程情况

针对 Grand Banks 某浮式生产储油装置 (FPSO), 开展离心模型试验。Grand Banks 属于大西洋北美大陆棚的一部分, 位于加拿大纽芬兰岛东南部, 石油和天然气资源丰富, 平均水深约 55 m , 局部达到 180 m , 海床以砂土为主, 海况环境复杂。该海域某 FPSO 选用锚桩作为单点系泊系统的锚固基础, 锚桩直径 $d=2\text{ m}$, 桩长 $L=30\text{ m}$, 长径比 $L/d=15$ ^[4]。

1.2 模型试验概况

(1) 离心模型试验

离心模型试验依托大连理工大学的土工鼓式离心机 GT450/1.4 开展, 主要装置包括模型箱、“一”字线激光器、运动相机、钢丝绳、荷载传感器和作动加载装置 (图 1)。模型箱尺寸为 238 mm (径向深度) $\times 330\text{ mm}$ (竖向宽度) $\times 424\text{ mm}$ (环向宽度), 外壁为铝制材料, 内部隔板和盖板均为透明有机玻璃, 底板中部安有相机支座, 侧板中线处设有可移动滑轮以调整加载角度, 竖向隔板留有缝隙以保证钢丝绳穿过 (图 2)。固定在作动器连接板上的激光器型号为 FU520AL1200-GD22, 波长为 520 nm , 最大功率达 1200 mW , 可调节焦距和功率确保散斑场良好。运动相机选用 HERO9 Black, 分辨率和采样帧率在试验过程中分别设置为 2704×2028 和 50 Hz , 布置于模型箱底板的保护壳内。钢丝绳直径为 1.0 mm , 最大承重可达 637 N , 经测量在 200 N 拉力下发生弹性变形且应变小于 1% 。采用 800 N 量程的“CSF-3A”拉压力传感器, 与作动器连接板的吊环柔性连接以保证荷载作用线与传感器受力轴线重合。试验数据通过离心机配备的无线数据采集系统实时采集和处理。

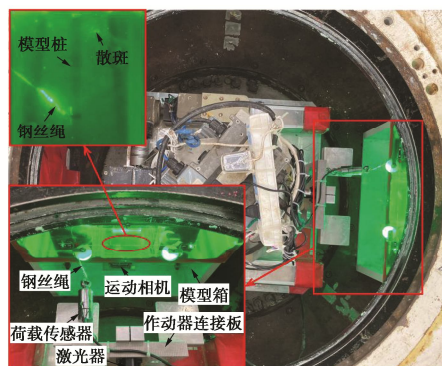


图 1 离心模型试验系统

Fig. 1 System of centrifugal model tests

(2) $1g$ 模型试验

$1g$ 模型试验系统主要包括反力架、有机玻璃制成的模型箱、“一”字线激光器、运动相机、钢丝绳、

Maxon 电机及其驱动装置、连接板、荷载传感器和 DHDAS 动态信号采集分析系统 (图 3)。

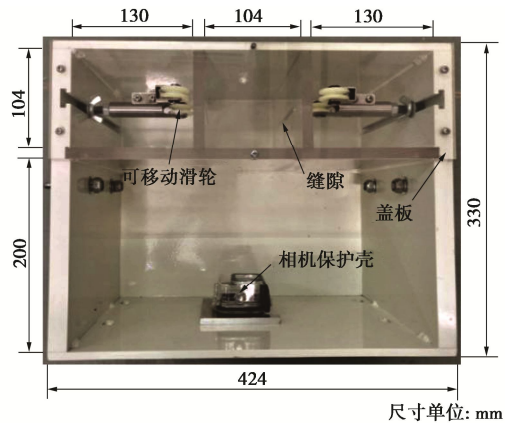


图 2 离心试验模型箱

Fig. 2 Model container in centrifugal model tests

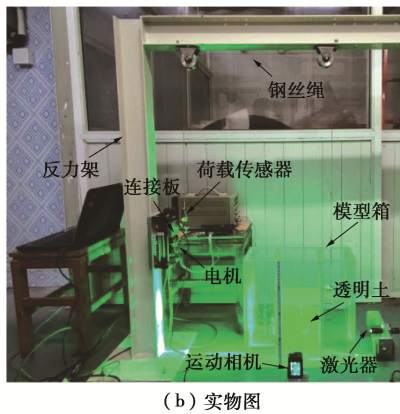
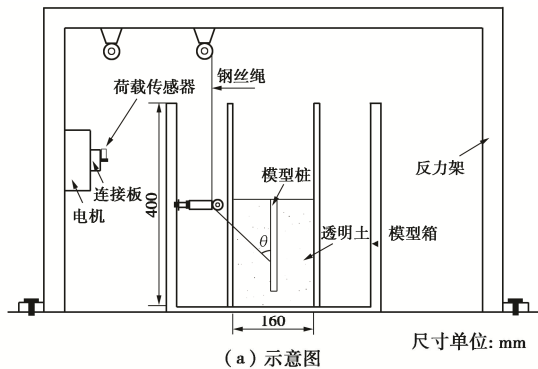


图 3 1g 模型试验装置

Fig. 3 System of 1g model tests

1.3 透明土性质

选用徐州新沂万和矿业有限公司生产的熔融石英砂配制透明土^[17], 其有效重度和结构特征与天然砂土较为接近, 经激光照射所形成的散斑场比较清晰, 透明度可达 15~20 cm, 与 Song 等^[13]和 Black^[16]所用透明土材料相比, 光学透明性提高了约 2.7 倍。熔融石英砂的粒径范围在 0.5~1.0 mm, 平均粒径 $d_{50} = 0.727$ mm, 颗粒级配如表 1 所示, 其基本物理力学参数为: 相对质量密度 G_s 为 2.186, 最大干密度 ρ_{\max} 为 1.274

g/cm^3 , 最小干密度 ρ_{\min} 为 0.970 g/cm^3 , 70% 相对密度下的内摩擦角 $\varphi = 39.4^\circ$ 。对应的孔隙液由正十二烷和 15 号白油按照约 1:4 的质量比例混合而成, 在实验室温度 (25°C) 下的黏度系数分别为 1.8, 29.1 mPa.s, 均属于低黏度流体; 混合液在 24°C 环境下的折射率为 1.4585, 化学性质稳定且无腐蚀性。

表 1 熔融石英砂颗粒级配

Table 1 Grain-size distribution of fused quartz	
粒径范围/mm	质量百分比/%
<0.5	1.34
0.5~0.6	16.71
0.6~0.85	62.75
0.85~1.0	18.48
>1.0	0.72

1.4 试验方案

离心模型试验步骤具体如下: ①调整移动滑轮的位置使加载角度达到设计值, 通过夹具将桩悬于空模型箱中央, 桩端距箱底 16 mm 以减弱边界效应的影响^[18], 将钢丝绳一端系在桩眼上并绕过可移动滑轮; ②将孔隙液缓慢倒入箱内, 在距离液面 10 cm 的高度将熔融石英砂匀速撒进孔隙液中, 桩能够稳定直立后撤除夹具, 再将模型箱放入真空中抽除液体中的空气; ③将有机玻璃板放于透明土上方, 在板的上表面施加垂直静压力使土样达到 70% 的相对密度, 同时保证透明土表面与桩头齐平; ④待土样密封静置完成, 将模型箱放入离心机的鼓槽内, 把钢丝绳另一端系在荷载传感器上; ⑤启动离心机并逐级提速到设定的离心加速度, 通过鼓槽与作动器的环向转速差拉动钢丝绳, 从而对锚桩施加拉拔荷载 (图 4), 转速差设为 $2.25^\circ/100 \text{ s}$ 以保证排水条件^[19]。

1g 模型试验采用和离心模型试验相同的制样方法和加载模式, 电机以 0.1 mm/s 的速率通过滑轮和钢丝绳拖动锚桩运动, 实现单侧拉拔。

1.5 工况设计

根据上述工程背景和离心机基本参数^[20], 在离心模型试验中: 离心机转速设定为 281 r/min, 对应透明土模型深 1/3 处的离心加速度为 50g; 模型桩选用端部开口的管桩, 由有机玻璃制成以使桩侧的透明度达到最佳; 模型桩直径为 8 mm, 壁厚 1.5 mm, 长 120 mm, 并在距桩头 80 mm 处设置锚眼, 对应原型的锚桩直径为 0.4 m, 长度为 6 m, 长径比等于 15, 即工程原型与离心模型之间的几何比尺 $\lambda = 5$; 对于张紧式或半张紧式单点系泊系统, 系泊链与竖直方向的夹角在锚眼位置通常介于 $40^\circ \sim 60^\circ$ ^[21], 因此荷载方向与锚桩轴线间的夹角 θ 为 $37^\circ, 45^\circ, 53^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 。在 1g 模型试验中: 端部开口的有机玻璃管桩直径为 12 mm, 壁厚 2 mm, 长径比为 15, 锚眼距离桩头 120

mm; 加载角度 $\theta = 37^\circ, 45^\circ, 53^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 。模型试验共 10 组, 工况见表 2 所示。

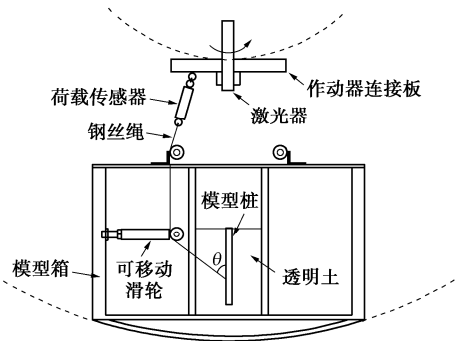


图 4 离心模型试验布置

Fig. 4 Layout of centrifugal model tests

表 2 模型试验工况

Table 2 Model test conditions			
试验类型	桩径 d/mm	长径比 L/d	加载角度 $\theta/(^\circ)$
50g 离心模型试验	8	15	37
			45
			53
			60
			75
1g 模型试验	12	15	37
			45
			53
			60
			75

2 试验结果与分析

在 1g 模型试验中, 透明砂土只满足内摩擦角等无量纲物理量的相似关系, 没有完全按照锚桩的几何比尺进行折减。因此, 仅从定性的角度比较离心模型试验结果和 1g 模型试验结果, 并且结果均为模型尺度。

2.1 拉拔荷载-位移曲线发展规律

不同工况下桩的拉拔荷载-位移曲线如图 5 所示, 其中, 通过比较图像中锚眼的标识在不同时刻的位置, 以获得锚眼处的位移。对于加载角度为 60° 和 75° 的离心模型试验, 由于模型桩桩身发生断裂, 仅取桩体破坏前的荷载-位移曲线。

由图 5 可见, 各荷载-位移曲线具有明显的非线性特征, 并且呈现出两种发展规律: 当加载角度较小时 (53° 左右及以下), 在曲线的初始阶段, 桩所受荷载随着位移的增加而提高, 但增长速率逐渐减缓, 锚桩发生较小的位移后, 其竖向位移分量明显增大而出现将被拔出的趋势, 此后曲线出现峰值或逐渐趋于平缓, 即便曲线后半段出现下降, 变化幅度也很小; 当加载角度较大超过 60° 时, 桩所受荷载始终随着位移的增加而提高, 增长速率也明显高于较小加载角度时的荷载增长速率, 原因是随着加载角度的增大, 桩开始沿着水平方向运动并发生旋转, 土体对桩的阻力得到了

充分发挥。

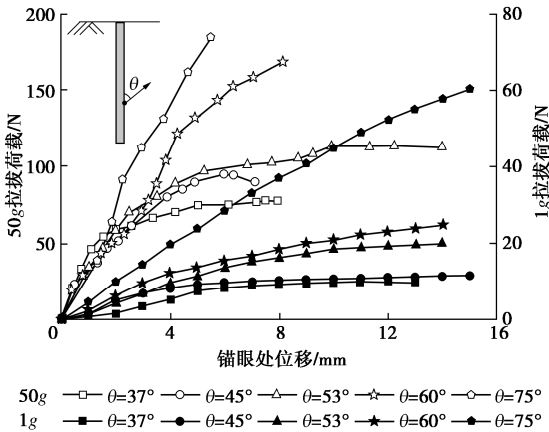


图 5 拉拔荷载-位移曲线

Fig. 5 Curves of pull-out load-displacement

2.2 极限承载力

对于荷载-位移曲线具有峰值点或稳定发展阶段的试验工况, 取峰值点或位移持续增加而荷载基本不再变化的点所对应的荷载作为锚桩的极限抗拔承载力; 其他工况采用“双切线法”, 即曲线初始阶段和最终阶段的切线交点对应的荷载^[22]。锚桩的极限承载力如图 6 所示。

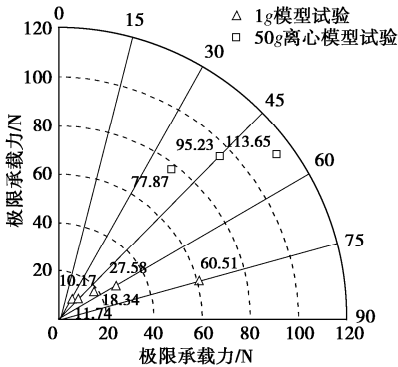


图 6 锚桩极限承载力

Fig. 6 Ultimate pulling resistances of anchor piles

由图 6 可知, 对于离心模型试验和 1g 模型试验, 桩的抗拔承载力均随着加载角度的增加而不断提高。在离心模型试验中, 与 37° 加载角度相比, 加载角度为 45° 和 53° 时的抗拔承载力分别提高 22% 和 46%; 在 1g 模型试验中, 加载角度为 45° 和 53° 的抗拔承载力与 37° 时相比分别增加 15% 和 80%。锚桩的承载力在很大程度上取决于桩体表面的侧向摩阻力和被动土压力: 当加载角度较小时, 主要由摩阻力提供抗拔承载力; 当加载角度较大时, 被动土压力成为承载力的主导因素。在离心模型试验中, 当加载角度由 53° 增加至 60° 时, 承载力增长幅度显著, 说明桩的失效模式开始发生变化; 在 1g 模型试验中, 承载力在加载角度由 60° 增加至 75° 时变化最为明显。当加载角度较小时, 锚桩的失效模式为竖直拔出, 当加载角度较

大时, 失效模式转变为斜向平动和旋转的组合形式, Guo 等^[21]在倾斜拉拔荷载下吸力锚的模型试验中, 发现了相同的失效模式随加载角度的变化规律。因此, 在应用单点系泊系统时应尽可能使锚链与锚桩形成较大拉拔角度以充分发挥锚桩的极限承载力。

将 Huang 等^[2]关于饱和硅砂中刚性桩的离心模型试验结果与文中离心模型试验结果进行对比, 并参照吸力锚承载力分析方法^[23], 将桩的极限承载力 P_u 进行归一化处理:

$$N_P = P_u / (\gamma' d h_p^2), \quad (1)$$

式中, N_P 为归一化承载力, γ' 为土的有效重度, h_p 为桩的贯入深度, 如图 7 所示。由图 7 可知, Huang 等^[2]试验中的桩承载力同样随着加载角度的增大而逐渐提升, 归一化后两者的承载力相差在 30% 左右。考虑到加载位置和模型桩刚度有所不同, 归一化承载力的差距在可接受范围内, 说明基于透明砂土的离心模型试验可以反映真实应力场中锚桩的承载能力。

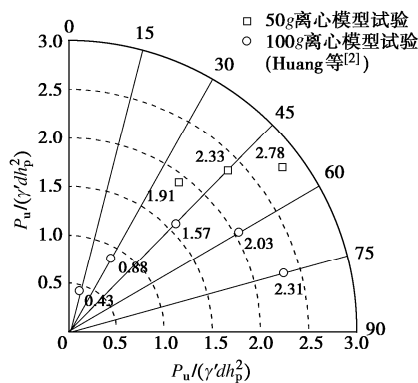


图 7 归一化极限承载力

Fig. 7 Normalized pulling resistances

2.3 桩周土体位移场

在桩的倾斜拉拔过程中, 通过激光器和相机记录桩周土体竖向切面的散斑场; 采用德国 PIVTEC 公司开发的 PIVview2C 软件对散斑场进行 PIV 分析, 从而获得土体的二维位移场。锚桩达到极限承载力时桩周土的位移矢量如图 8 所示, 图中横坐标和纵坐标分别表示土体与桩的水平距离和纵向距离, 并将距离和土体位移 δ 通过桩径 d 进行无量纲化。

由图 8 可见, 桩在倾斜拉拔荷载作用下沿竖直向上和水平的方向运动, 使位于桩被动土压力侧的土体呈现出整体倾斜向上的位移形式。对比不同加载角度的土体位移特征, 可以发现随着加载角度的减小, 桩周土体的竖向位移分量更为明显。当加载角度为 75° 时, 土体的竖向位移分量和水平位移分量大致相等, 当加载角度为 37° 时, 土体的竖向位移明显高于水平位移 (图 9)。

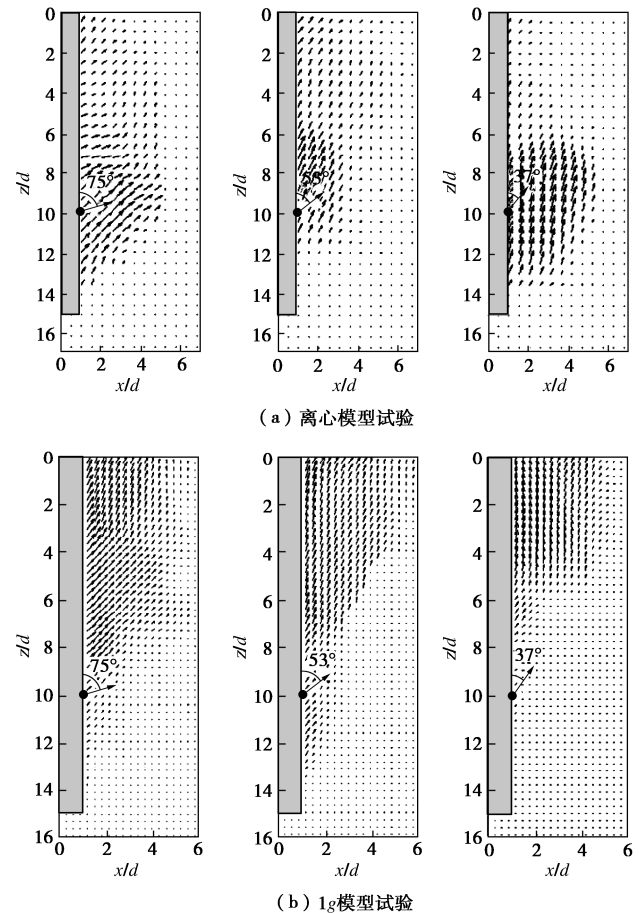
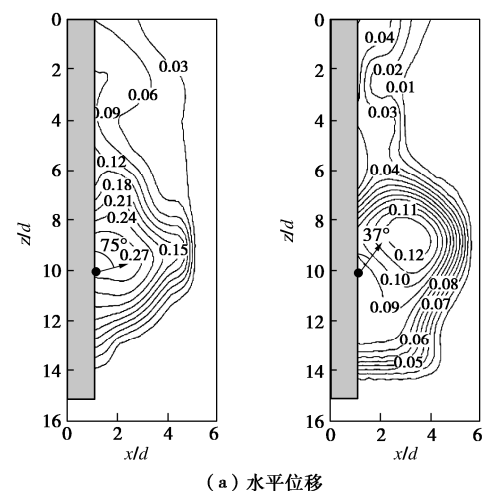


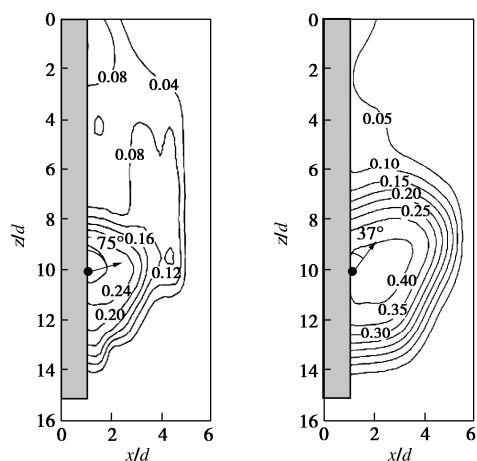
图 8 位移矢量图

Fig. 8 Displacement vectors

为了更加清楚地比较离心模型试验和 1g 模型试验的桩周土体位移量, 绘制沿桩侧不同深度土的位移分布图, 如图 10 所示。由图 10 可知, 1g 条件下的土体位移量相对偏小, 这是因为离心模型试验中透明土的应力状态等效于原型土的应力状态, 根据 API RP 2A-WSD 规范^[24], 砂土中桩的单位面积摩阻力和单位长度水平承载力均得到增强, 因此锚桩失效时会对周围土体产生更大的作用力, 从而使土体发生更为显著的变形。



(a) 水平位移



(b) 竖向位移
图9 位移云图

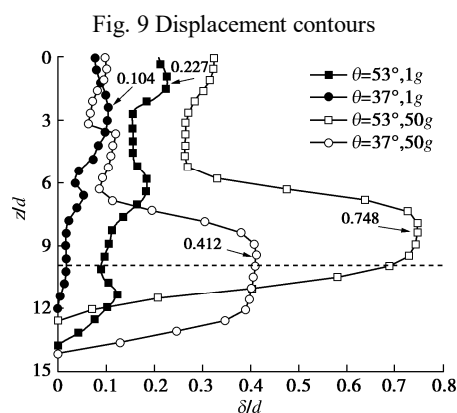


图10 土体位移-深度曲线

Fig. 10 Curves of soil displacement-depth

在1g模型试验中,不同深度的土体应力场差异并不显著,桩头和桩端附近土体的有效自重应力仅相差1.31 kPa,桩身各处所受的土体抗力相对接近,使土体位移量在深度方向较为均匀,靠近表面的土体由于上覆土重较小而产生较大位移。在离心模型试验中,土体的有效自重应力在桩头和桩端处相差可达42.52 kPa,浅层土体和深层土体对桩的作用力差别很大,导致土体变形量沿深度方向变化明显;桩身在锚眼附近的侧向位移尤为明显,锚眼周围土体受到桩的挤压而产生较大的位移。

3 结 论

结合透明砂土和PIV技术,搭建了可视化离心模型试验系统,对倾斜拉拔荷载作用下的锚桩力学响应开展了离心模型试验,在验证透明土中锚桩离心模型可靠性的基础上,重点讨论了不同加载角度下锚桩承载力、失效模式和桩周土位移场的变化规律,并与1g条件下透明土模型试验结果进行对比分析,可以得到以下3点结论。

(1)随着加载角度的增加,锚桩的抗拔承载力不断提升,如离心模型试验中,当加载角度为45°和

53°时,抗拔承载力与37°时相比分别提高了22%和46%;当加载角度由53°增加至60°时,承载力变化幅度明显,锚桩的失效模式由竖向拔出过渡到沿倾斜方向平动和转动的组合形式。

(2)桩周土的位移方向整体倾斜向上,加载角度越小,桩周土的竖向位移分量越为显著;桩侧土体的变形量沿深度方向差距比较明显,加载点附近的土体变形量最大。

(3)1g条件下土体位移场不能合理反映位移沿桩身方向的变化规律,土体变形沿桩身较为均匀,桩头周围的土体位移相对较大;锚桩达到极限承载力时对应的土体位移量小于离心模型试验条件下的土体位移量。

锚桩的承载特性与周围土体的破坏模式密切相关,根据桩周土体的位移云图分析剪切带形成过程,进而完善锚桩的承载力公式还有待进一步深入研究。在离心模型试验和1g模型试验中,桩径与透明砂土平均粒径的比值分别仅为11.0和16.5,小于徐光明等^[25]提出的下限值,因此对于后续的模式试验,在保证透明度的前提下,可以适当增加模型桩直径并减小熔融石英砂的粒径,从而消除粒径效应对试验结果的影响。

参考文献:

- [1] CARDOSO S P, SABOYA F, TIBANA S, et al. Centrifuge modelling of a combined pile-type anchor subjected to general inclined loading[J]. *Marine Structures*, 2020, **74**: 102815.
- [2] HUANG T, O'LOUGHLIN C, GAUDIN C, et al. Drained response of rigid piles in sand under an inclined tensile load[J]. *Géotechnique Letters*, 2020, **10**(1): 30-37.
- [3] PENG J S, LIU H X, ZHAO Y B, et al. Failure mode and pullout capacity of anchor piles in soils with cohesive and cohesionless properties[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, **38**(9): 1056-1069.
- [4] RAMADAN M I, BUTT S D, POPESCU R. Offshore anchor piles under mooring forces: centrifuge modeling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(4): 373-381.
- [5] RAMADAN M I, BUTT S D, POPESCU R. Offshore anchor piles under mooring forces: numerical modeling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(2): 189-199.
- [6] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(2): 121-132.
- [7] QI C G, ISKANDER M, OMIDVAR M. Soil deformations during casing jacking and extraction of expanded-shoe piles, using model tests[J]. *Geotechnical and Geological*

- Engineering, 2017, **35**(2): 809-826.
- [8] SANG Y, WANG Z T, YU S K, et al. The loading test on the single pile with pile cap in transparent soil model[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, **42**(2): 20170153.
- [9] 周东, 刘汉龙, 仇文岗, 等. 被动桩侧土体位移场的透明土模型试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(7): 2686-2694. (ZHOU Dong, LIU Hanlong, ZHANG Wengang, et al. Transparent soil model test on the displacement field of soil around single passive pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(7): 2686-2694. (in Chinese))
- [10] CAO Z H, LIU H L, KONG G Q, et al. Physical modelling of pipe piles under oblique pullout loads using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Journal of Central South University, 2015, **22**(11): 4329-4336.
- [11] KONG G Q, CAO Z H, ZHOU H, et al. Analysis of piles under oblique pullout load using transparent-soil models[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 20140109.
- [12] 王永志, 王海, 袁晓铭, 等. 土工离心试验应力相似差异特征与设计准则[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(11): 2148-2154. (WANG Yongzhi, WANG Hai, YUAN Xiaoming, et al. Difference characteristics of stress similitude for geotechnical centrifuge modelling and design criteria[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(11): 2148-2154. (in Chinese))
- [13] SONG Z H, HU Y X, O'LOUGHLIN C, RANDOLPH M F. Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(10): 1475-1485.
- [14] ISKANDER M, BATHURST R J, OMIDVAR M. Past, present, and future of transparent soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 20150079.
- [15] PINCUS H J, ISKANDER M G, LAI J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(4): 425.
- [16] BLACK J A. Centrifuge modelling with transparent soil and laser aided imaging[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 20140231.
- [17] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1140-1146. (KONG Gangqiang, LIU Lu, LIU Hanlong, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1140-1146. (in Chinese))
- [18] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFLEKOU S. Centrifugal testing of laterally loaded piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(2): 208-216.
- [19] DYSON G J, RANDOLPH M F. Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(4): 346-352.
- [20] WANG Z T, XU B, LUAN M T, YANG L Q. An introduction to a new drum centrifuge at DUT[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, **170-173**: 3106-3111.
- [21] GUO Z, JENG D S, GUO W, et al. Failure mode and capacity of suction caisson under inclined short-term static and one-way cyclic loadings[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, **36**(1): 52-63.
- [22] HAMED M, CANAKCI H, NASR A. Analysis of vertical piles embedded in organic soil under oblique pull-out load[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, **42**(5): 20170178.
- [23] ZHAO L, GAUDIN C, O'LOUGHLIN C D, et al. Drained capacity of a suction caisson in sand under inclined loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(2): 04018107.
- [24] API. Recommended Practice 2A-WSD[S]. American Petroleum Institute, 2007.
- [25] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 80-86. (XU Guangming, ZHANG Weimin. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 80-86. (in Chinese))