

· 地基与基础 ·

波浪作用下局部冲刷群桩动力特性试验研究*



代浩^{1,2}, 戴国亮^{1,2}, 杨炎华³

(1. 东南大学预应力及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏南京 210096;
2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096; 3. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北武汉 430000)

摘要: 利用模型试验对深水桥墩群桩基础进行研究。用摇摆式造波装置施加波浪荷载, 基于典型的冲刷坑形态, 通过开挖桩周土体模拟不同的冲刷深度, 探讨不同冲刷深度下桩基在波浪荷载作用下的动力反应。作为对比, 同样进行了同参数下的单桩平行试验。研究表明: 随着冲刷深度的增加, 桩基础的自振频率逐渐降低, 桩顶加速度和位移幅值呈增大趋势。桩基动力响应同时受水深的影响——随着水深的增大, 位移和加速度也有所增加。在实际工程设计中, 应该考虑桩基冲刷受损程度和水文条件的综合影响。

关键词: 局部冲刷; 波浪作用; 动力响应; 试验研究

中图分类号: TU 473.1⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0147-05

Experimental study on dynamic response of local scoured group piles under wave loading

DAI Hao^{1,2}, DAI Guo-liang^{1,2}, YANG Yan-hua³

(1. Key Laboratory for RC and PRC Structures of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Using swing wave-making device to exert wave loading, a model test is conducted to study the deep-water group piles. Simulating different scour depths by excavating the pile-surrounding soil, we probe into the dynamic response of the pile foundation at different depths under the wave action. Parallel contrast tests of single pile foundation at the same parameters are also conducted for a comparison. The results show that the natural frequency of deep-water structure is changing during the vibration. As the scour depth increases, the natural frequency of pile decreases, and the acceleration and displacement of the pile top also increase. At the same time, these responses increase with the increasing depth of water. In design, both piles' scouring damage degree and hydrological condition should be considered.

Keywords: local scour; wave load; dynamic response; experimental study

近年来, 跨海大桥、大型港口、海上采油平台、海上风电等海工建筑发展迅猛, 其建设条件恶劣、受力复杂、影响因素繁多。桩基础以其适应性强、承载能力高、沉降小的优点被广泛应用于这些海工建筑, 在深水环境下, 桩基础的存在改变了其周围的局部波浪、水流动力场, 造成桩

周水流速度加快, 引起土颗粒移动, 形成局部冲刷坑。已有统计^[1-2]表明, 冲刷是桥梁破坏的一大因素, 既有局部冲刷的桥墩, 在波浪荷载下, 其桩基的安全性能、动力响应将变得更为复杂。对于大型桥墩、海上风电基础等海工构筑物在冲刷作用、波浪荷载作用下的动力响应, 国内外许

收稿日期: 2016-04-26

*基金项目: 国家“973”计划资助项目(2013CB036304); 交通运输部应用基础研究项目(2013319759060)

作者简介: 代浩(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桩基础和海上风电基础的研究。

多学者也做过许多研究, Wang 等^[3]研究了冲刷作用对混凝土桥梁动力特性和抗震性能的影响, 研究成果可为桥梁抗震设计提供参考; 王哲等^[4]分析了双排筒桩在波浪等水平荷载下桩基的内力和变位, 但考虑到其自振频率远大于荷载的频率, 采用的是静力计算方法; 吴加云^[5]针对特大型钢吊箱结构, 采用特征波法研究了其在波浪荷载作用下的动力响应, 结果表明设计过程中可以适当乘以一放大系数以考虑动力的影响; Kong 等^[6]通过模型试验, 重点分析了单桩在冲刷作用下的静力与动力响应特性, 提出3种检测桥梁基础冲刷的方法; 戴国亮等^[7]比较了不同的波浪理论对海上风电场动力响应规律的差异, 最终选用 Stokes 五阶波作为东海大桥设计依据。上述关于冲刷、波浪对桩基动力响应的研究多为独立进行理论和模拟分析。本文通过室内模型试验, 以单桩和群桩基础为研究对象, 考虑典型的冲刷坑形态, 研究波浪荷载作用、不同冲刷深度、不同水深条件下桩基的动力响应规律。

1 模型试验概况

1.1 试验场地条件及装置

试验在南京水利科学院波流试验厅进行, 根据《波浪模型试验规程》^[8], 涉水建筑物周围的局部冲刷问题, 目前国内外主要采用局部正态模型试验或模型延伸法两种手段进行研究。针对东海大桥海上风电项目钢管桩基础(桩径 1.7 m、桩长 78 m), 结合本次试验目的、技术要求及场地条件限制, 选定近似比尺 1:30 进行研究, 根据模型桩基结构尺寸、水深、波浪等因素, 选定宽水槽几何尺寸为 40 m×5 m×0.3 m(长×净宽×壁厚), 水槽设计成单向流水槽, 上游采用量水堰调控进水量, 下游采用横向推拉式尾门微调水位, 并设有排水口(图1)。水槽动床段长 12 m, 宽 5.0 m, 铺砂厚度为 0.6 m, 桥墩基础布置在试验段的中央。水槽端部为摇摆式造波装置, 可产生规则波, 试验时根据相应波要素产生规则波, 形成波浪动力。

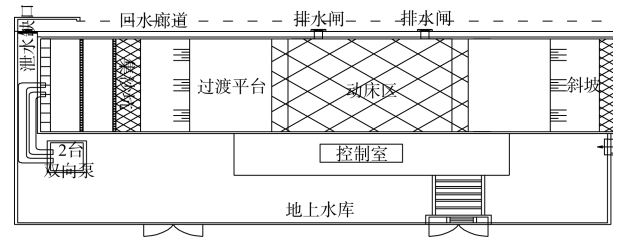


图1 试验宽水槽

采用电子加速度传感器、数据自动采集仪, 配合无线环境激励实验模态测试分析系统的使用, 可以方便地求得桩基础的加速度时程曲线, 由加速度积分求得桩顶位移, 由频谱图求得桩基础的振动频率。

1.2 模型桩制作

本次试验模型桩为钢管制作, 桩外径 D 为 6 cm, 壁厚 d 为 3 mm, 桩长 L 为 100 cm, 模型桩的弹性模量为 212 GPa, 单桩和群桩基础结构见图2。

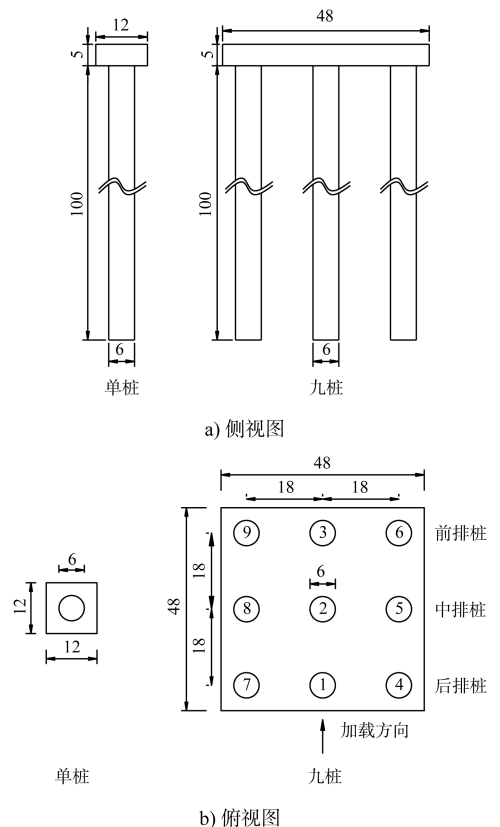


图2 桩基础结构(单位: cm。下同)

群桩桩距为 $3D$ (18 cm), 采用典型的九桩布置, 承台的制作采用厚 1 cm 的钢板, 侧面采用薄钢片绕承台焊接而成, 钢片高 5 cm, 承台内部通过螺丝固定桩顶, 使桩与承台固结。

1.3 试验砂床

参考《海岸河口潮流,泥沙数值模拟技术规程》^[9]相关规定,模型试验砂床采用天然长江砂,

通过土工试验得到砂土参数(表1)。砂土密实度为中密状态,其颗粒级配曲线见图3,分层填铺砂土并夯实,保证土样的均匀密实性。

表1 模型土体参数

密实密度 $\rho/(t/m^3)$	干密度 $\rho_d/(t/m^3)$	中值粒径 d_{50}/mm	相对密实度 $D_r/\%$	剪切模量 E_s/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	泊松比
2.65	1.46	0.204	70	13.10	30	0.24

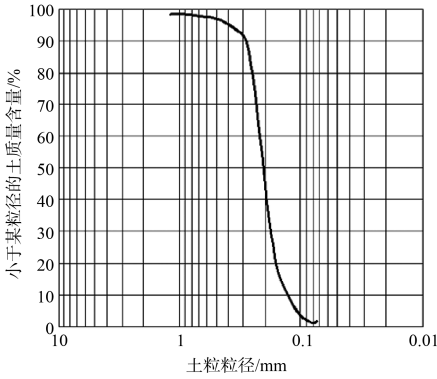


图3 模型砂颗粒级配累积曲线

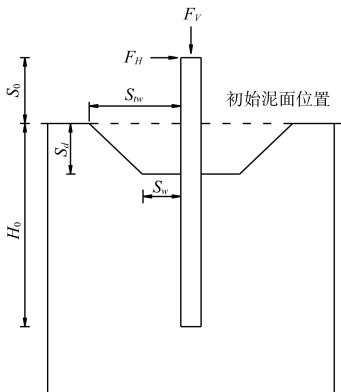
1.4 试验方案设计

本次试验波浪为线性规则波,波要素为原型波高3.0 m,波周期8.25 s,模型波高为10 cm,波周期2 s。针对单桩、九桩基础进行研究,选取3种模型水深条件,分别为25、35和45 cm。

同贾承岳^[10]通过放坡考虑局部冲刷类似,本次局部冲刷的模拟通过开挖桩周土体实现,局部冲刷坑见图4。设计冲刷深度见表2。

表2 设计冲刷深度

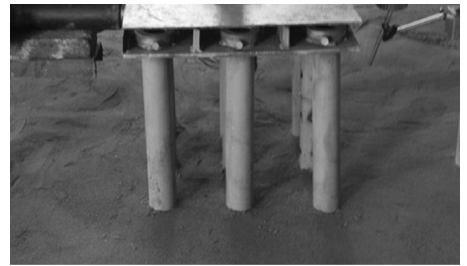
试验组次	1#	2#	3#
冲刷深度 S_d/cm	0	15	30



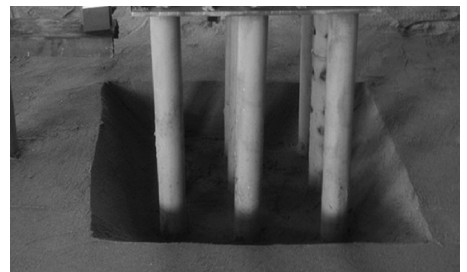
注: S_d 为冲刷深度, S_0 为自由长度, H_0 为初始入土深度, S_w 为冲刷坑顶的宽度, S_w 为冲刷坑底的宽度。

图4 桩基局部冲刷坑

据文献[11]的建议,取 $S_{nw} \approx 2S_d$, $S_w \approx 0$ 。在试验槽中预埋模型桩,桩底直接埋入砂中,桩底距水槽底部5 cm。初始自由长度 $S_0 = 45$ cm,入土深度 $H_0 = 55$ cm,设计冲刷深度 S_d 分别为15 cm(平面冲刷范围60 cm×60 cm)、30 cm(平面冲刷范围120 cm×120 cm),其中九桩局部冲刷坑见图5。在波浪试验中,端部出水口开放以消除反射波的影响。



a) 无冲刷



b) 冲刷深度15 cm



c) 冲刷深度30 cm

图5 九桩局部冲刷坑

试验测点布置在结构动力响应值最大、干扰相对较小的桩顶处，在桩顶沿纵横两方向布置(图6)，采集对应的加速度响应及位移响应。图7为15 cm冲刷、水深35 cm波浪荷载中及完成后的示意。

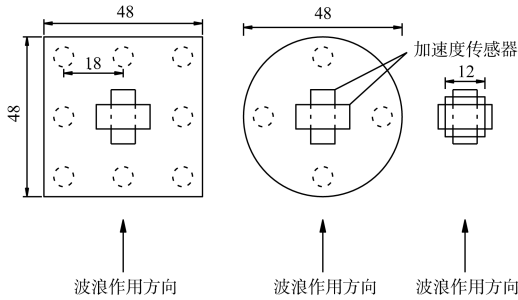
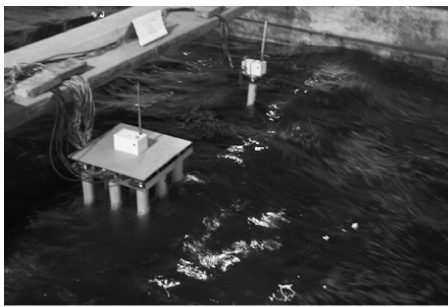
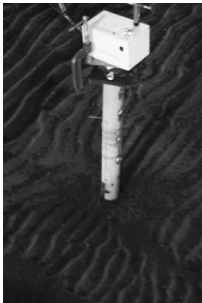


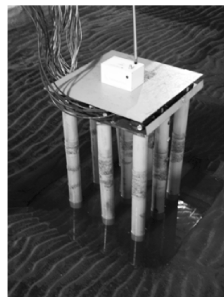
图6 加速度传感器布置



a) 波浪荷载中



b) 单桩



c) 九桩

图7 研究试验现场

2 试验结果分析

2.1 单桩

根据加速度传感器所得频谱图，利用模态频率统计平均法计算模态参数频率，分别确定单桩、九桩振动频率 f (表3)。

表3 单桩实测频率

Hz

桩型 工况	单桩		九桩	
	冲刷/cm	频率 f	冲刷/cm	频率 f
水深 25 cm	0	3.26	0	3.26
	15	1.95	15	1.76
	30	1.17	30	1.17
水深 35 cm	0	3.26	0	3.26
	15	1.76	15	3.26
	30	1.17	30	1.17
水深 45 cm	0	6.51	0	6.51
	15	3.26	15	3.26
	30	1.17	30	1.17

单桩基础取数所得频率 f 与冲刷深度、水深的关系见图8。由图8可知，单桩振动频率随冲刷深度的增加而有所降低；冲刷深度越大，振动频率降低越多。一般来说，基础的固有频率只与结构和边界条件有关，与环境激励无关。测试结果显示，单桩、九桩的基频大多集中在3.26 Hz左右，

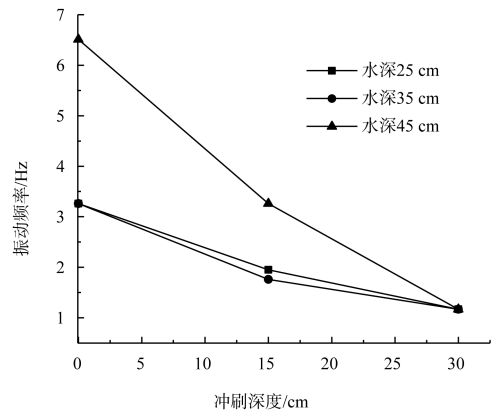


图8 单桩频率-冲刷曲线

本次试验实测结果中，在波浪作用下，单桩、九桩的振动频率相近，这是因为群桩基础的冲刷范围较大，类似于整体冲刷，相比单桩的局部冲刷，其自振频率降低幅度较大，数值接近于单桩基础。结构的自振频率受冲刷深度影响，随着基础周围土体被冲刷，体系的自振频率降低，说明其不仅与结构的质量和刚度有关，还与边界条件有关。

2.2 桩顶加速度

根据仪器自动采集的数据, 绘出桩基础加速度幅值与冲刷深度、水深的关系(图 9)。随着冲刷深度的增加, 桩基自由长度增大, 外露部分附加质量变大, 桩顶加速度幅值范围总体呈增大趋势, 但增大不明显, 可能是因为钢管桩刚度较大, 引起动力响应较小。此外, 水深对高承台桩基础的加速度响应也有影响, 随着水深的增大而增加。

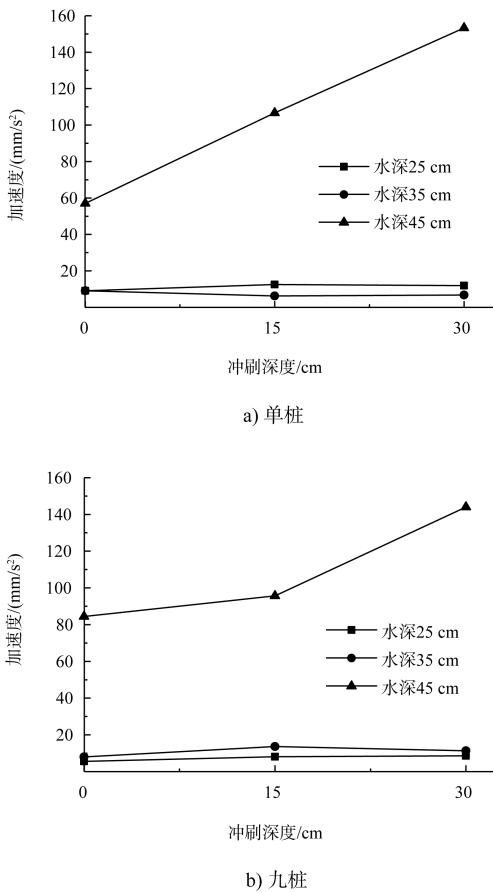


图 9 桩顶加速度-冲深曲线

水深 25 cm 和 35 cm 时对应的加速度幅值相近, 加速度数值在 $0 \sim 20 \text{ mm/s}^2$ 之间变化, 增加的幅度不大, 水深 45 cm 时对应的加速度幅值急剧增大, 九桩的加速度数值突增至 140 mm/s^2 左右, 当水深达到一定数值时, 冲刷对桩基础加速度值的影响程度变大, 其中群桩更为明显。

2.3 桩顶位移

对加速度进行积分, 可得在波浪作用下的桩顶位移值, 根据桩顶位移时程曲线可知, 桩基础的位移值均较小, 这是因为模型整体刚度较大。

在波浪作用下, 基础水平位移响应的纵向值大于横向值, 约为 3~6 倍。波浪荷载下, 桩基纵向水平位移与冲刷深度的关系曲线见图 10。

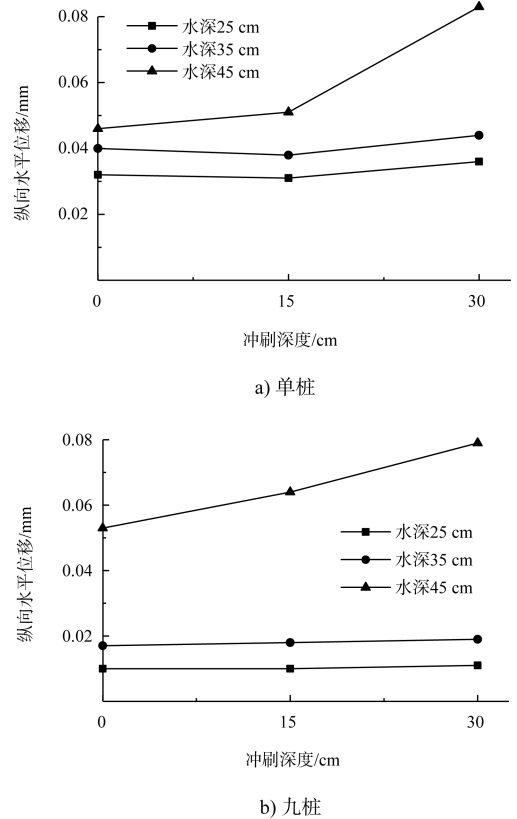


图 10 水平位移-冲深曲线

随着冲刷深度的增大, 桩的入土深度减小, 土体对基础的约束力降低, 整个体系的刚度降低, 自振周期延长, 使得桩基础的位移幅值呈逐渐变大的趋势。随着水深的增加, 波浪对桩的力作用点沿桩身上移, 对应的位移幅值也呈变大的趋势。

3 结论

1) 冲刷深度增加, 桩基础的自振频率有所降低, 且冲刷深度越大, 自振频率降低越多。所测单桩的基频大多集中在 3.26 Hz 左右, 所测的模态参数在理论分析值范围内。

2) 冲刷深度增加, 桩顶加速度幅值范围总体呈增大趋势, 但部分增大不明显, 这是因为钢管桩刚度较大, 波浪动力响应较小。此外, 水深对高承台桩基础的加速度响应也有影响, 随着水深的增大而增加。