

海上风机高桩承台结构波浪冲击载荷实验研究

魏明珠^{1,2}, 周济福^{1,2}, 王旭¹

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京, 100190;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京, 100149, Email: zhoujf@imech.ac.cn weimingzhu@imech.ac.cn)

摘要: 针对海上风机固定式支撑结构, 从实际工程需求出发, 利用实验室实验的方法, 研究非线性波浪下海上风机高桩承台结构所受波浪力的规律。通过对高桩承台整体结构和无承台的群桩在不同水深下的 14 种实验工况的分析, 分析了承台对群桩波浪力的影响。

关键词: 海上风机; 高桩承台; 波浪冲击载荷

1 引言

在近海风能的开采中, 固定式高桩承台支撑结构是我国海上风机的主要基础形式。高桩承台基础的组成结构包括单桩、群桩、承台, 各独立部分的波浪载荷计算虽已有较成熟的计算方法, 但其组合结构形式的波浪载荷特征一直是设计过程中十分关注的问题。近几年, 许多学者针对高桩承台类型的结构研究了其波浪载荷的计算方法。姚文伟^[1]、兰雅梅^[2]、刘桦^[3]研究了承台结构的存在对桩柱波浪力的影响规律。刘桦^[3]还进行了桩基承台结构在不规则波和海流共同作用下的波流实验, 由实验结果得到了群桩效应系数及其变化规律, 并讨论了作用于近水面承台底部的波浪拍击力。刘正浩^[4]分析了波流联合作用下, 水深、波高条件对承台受力的影响。蔡子龙^[5]研究了承台淹没深度、波浪入射角等对承台所受波浪载荷的影响规律。雷欣欣等^[6]进行了高桩承台不规则波的物理实验研究, 分析了群桩的水动力特性, 确定了最大受力桩。Chang 和 Jeng^[7]采用数值模拟方法研究了高桩承台结构桩柱的波浪载荷特征。

高桩承台结构的波浪载荷比较复杂, 且通过数值模拟, 发现极端非线性波浪条件下, 高桩承台结构的会出现波浪冲击现象^[8]。但是目前与数值模拟相应的模型的实验却很少。为此, 本研究利用中科院力学所流固土耦合水槽实验系统, 开展了实验研究。为研究高桩承台整体结构和无承台的群桩在不同水深下的非线性波浪载荷特征, 设计了 14 种实验工况, 通过对桩体和承台上测点动压强的实验数据分析, 捕捉到了桩柱上的波浪冲击现象;

得到了承台结构存在与否对桩柱波浪力的影响特征。

2 实验设计

2.1 实验模型

实验对象的原型是目前已建成运行的东海大桥近海风电场的高桩承台结构。根据实验目的和实验室仪器设备条件,将高桩承台结构进行简化和缩比。实际的模型由上部圆柱体承台和下部 4 根直立桩体组成。模型整体高 68.4cm,其中承台高 20.4cm,承台的直径为 50cm,桩柱高 48cm,桩体直径 7cm。实物模型图如图 1 所示。

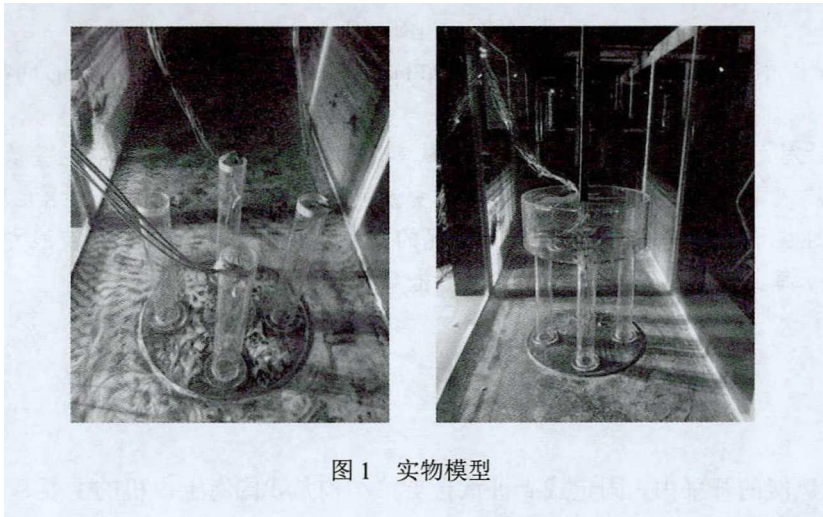


图1 实物模型

2.2 实验装置

实验在中国科学院力学研究所流固土耦合实验室进行。流固土耦合波流水槽全体长 52m,宽 1.0m,深 1.5m(实验段总深 3.3m)。造波系统采用液压伺服推板式造波机。实验室压力传感器为微型孔隙水压力传感器。点压力传感器分布于桩柱的内壁,用以测量不同位置桩柱表面的动压强分布。

本实验的各桩柱相对位置及点压力传感器测点布置如图 2 所示。Pile1 位于波浪来流方向, Pile2 位于侧面, Pile3 位于波浪下游。桩柱上共布置 11 个测点,其中 Pile1 和 Pile3 上各布置 4 个测点, Pile2 上布置 3 个测点,同桩柱上的测点均在同一垂线上,测点间距为 3cm。承台上共布置 4 个测点,其中承台圆心布置 1 个测点,在 Pile1、Pile3、Pile5 测点垂线与承台底板相交位置各布置 1 个测点。整体结构共布置 15 个测点。

2.3 实验工况

物理模型实验的入射波为单向规则波,波浪正向入射。实验目标为:捕捉波浪冲击现象,并探讨承台结构对桩柱波浪力的影响。实验采用 $H=20\text{cm}$ 的波高,通过改变水深从而改变承台底部和静水面间气隙,在无承台工况 (Case Ai) 和有承台工况 (Case Bi) 下分

别进行实验，各种实验组次的水动力参数如表 1 所示。

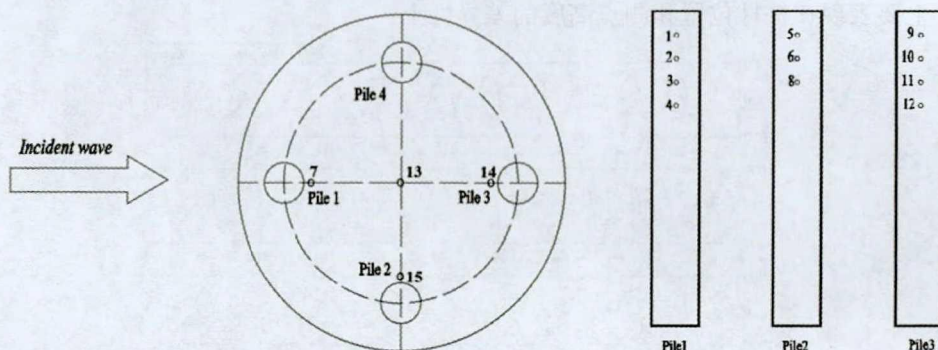


图 2 桩柱相对位置及传感器测点布置示意图

表 1 实验工况

实验组次	水深 (cm)	波高 (cm)	波周期 (s)	波长 (m)
Case A1 / Case B1	57.0	20	1.56	3.177
Case A2 / Case B2	54.0	20	1.56	3.130
Case A3 / Case B3	51.0	20	1.56	3.079
Case A4 / Case B4	49.0	20	1.56	3.045
Case A5 / Case B5	47.0	20	1.56	3.009
Case A6 / Case B6	44.0	20	1.56	2.954
Case A7 / Case B7	41.0	20	1.56	2.897

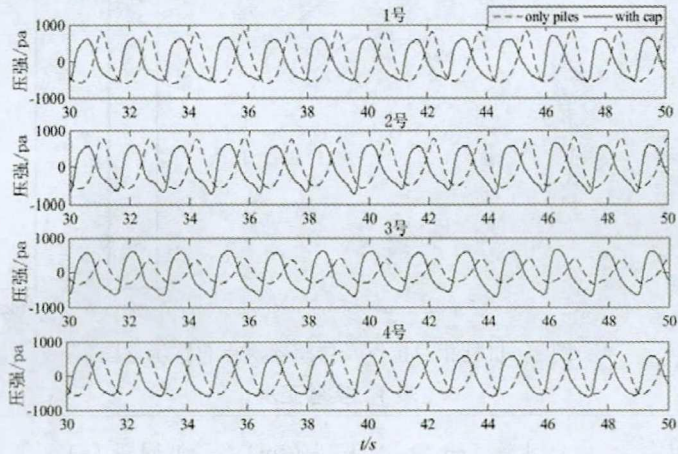
3 实验结果与讨论

3.1 承台结构对桩柱波浪力的影响

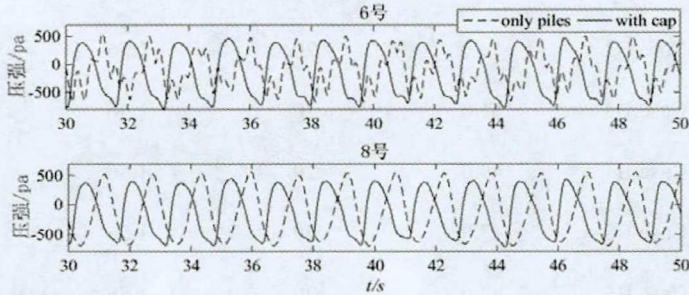
考虑到极端环境条件下，高桩承台在大波陡情况下的承载需求，分析水深在承台高度附近时，承台结构的存在对桩柱波浪力的影响。已知桩柱高 48cm，用以固定实验模型的薄板厚 1cm，故承台距离水槽底部 49cm，现以水深 $h=51\text{cm}$ ，波高 $H=20\text{cm}$ ，波浪周期 $T=1.56\text{s}$ 的工况为例进行分析。

无承台工况 (only piles)、有承台工况 (with cap) 下同测点的动压强时历曲线图，如图 3 所示。通过对比发现，Pile1 和 Pile2 在两种工况下动压强波形图和数值大小变化均不明显。Pile3 上最高的 9 号测点有承台工况下的动压强波形图上出现了尖锐的正向峰值，但与无承台工况相比数值大小的变化不明显；12 号测点有承台工况下的动压强变化幅度相比

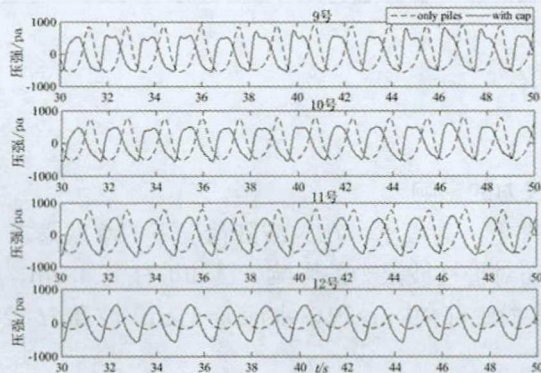
较于无承台工况更大。因此，实验结果表明，承台的存在对下部桩柱的受力产生了显著的影响，主要表现在桩柱位置和测点高度的差异性上。



(a) Pile1



(b) Pile2



(c) Pile3

图3 无承台和有承台工况下动压强时历曲线对比

3.2 桩柱上的波浪冲击现象

上节中发现有承台时,下游桩柱 Pile3 上的最高测点即 9 号测点,其测点动压强在即将达到原先的正向峰值时突然增大,产生了一个尖锐的峰值,此现象即为捕捉到的波浪冲击现象。通过分析波高 $H=20\text{cm}$ 时,另外 5 个水深时有承台工况下桩柱上的波浪载荷,发现水深 $h=47\text{cm}$ 和 49cm 时,桩柱上亦会出现波浪冲击现象,但未有 $h=51\text{cm}$ 时的现象明显,故以水深 $h=51\text{cm}$ 为例详细分析桩柱上的波浪冲击载荷。

现单独分析有承台工况下 9 号测点的动压强时历曲线图,如图 4 所示。图中虚线的椭圆标出产生的尖锐的峰值现象最为明显的时间段,44.59s 时峰值动压强为 807Pa,随后 44.9s 时降为 502.8Pa。

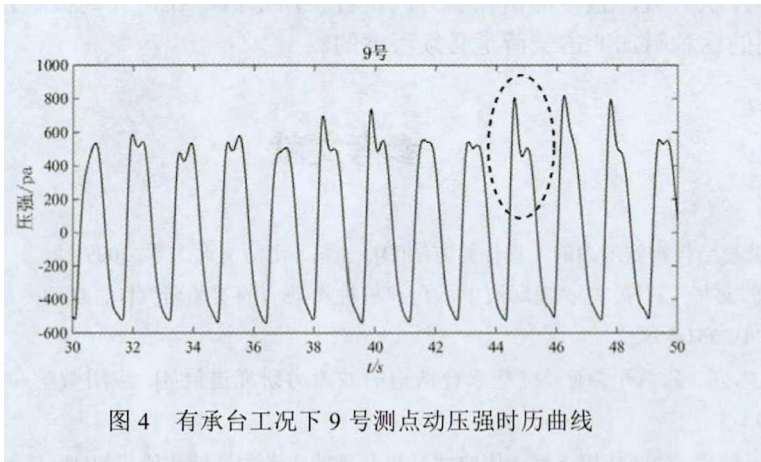


图 4 有承台工况下 9 号测点动压强时历曲线

有承台工况下 Pile3 不同高度测点的动压强变化图,如图 5 所示。从图 5 中可以明显看出有承台工况下出现瞬时冲击载荷的后方的桩柱即 Pile3 上最靠近承台底面的 9 号测点的动压强明显高于同桩其他 3 个测点。这个主要是因为为有承台工况下上升的水体受到承台阻碍影响被迫向前运动,形成了速度较大的水平片状射流,直接冲击在后方的桩柱上所形成。这个瞬时的冲击载荷不仅要求桩柱和承台间连接处有良好的承载能力,同时作为波浪环境下的循环载荷,对结构的疲劳损伤也需要着重考虑。

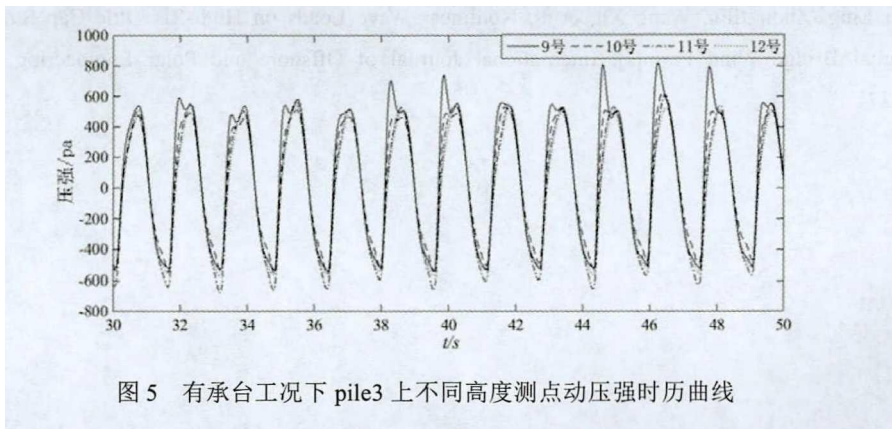


图 5 有承台工况下 pile3 上不同高度测点动压强时历曲线

3 结论

本研究从工程实际需求出发,利用实验室实验方法,研究极端海洋环境下海上风机高桩承台结构所受波浪力。实验数据表明,在非线性波条件下,静水面在承台底部高程附近时,波浪会直接冲击承台,此时,高桩承台结构下游位置的桩柱最靠近承台底面的测点的动压强明显高于同桩其他3个测点,这主要是因为上升的水体受到承台阻碍,形成了速度较大的水平片状射流,直接冲击在后方的桩柱上所形成。在研究高桩承台结构稳定性时,桩柱所受到的这种附加冲击载荷是必须考虑的。

参考文献

- 1 姚文伟. 桩基结构物波浪力的工程计算方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- 2 兰雅梅, 郭文华, 刘桦, 等. 规则波中承台和桩柱水动力的实验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(04): 551-558.
- 3 刘桦, 王本龙, 薛雷平, 等. 桩基承台结构的波流力研究进展[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(10): 1098-1109.
- 4 刘正浩, 万德成. 波流作用下海上固定式风机基础的水动力性能数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(05): 555-560.5
- 5 蔡子龙. 海洋环境中桩—承台复合基础波浪荷载研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- 6 雷欣欣, 孙大鹏, 徐雪蛟, 等. 作用在高桩承台上的不规则波波浪力试验研究[J]. 水道港口, 2013, 34(04): 277-284.
- 7 Chang K T, Jeng D S. Numerical study for wave-induced seabed response around offshore wind turbine foundation in Donghai offshore wind farm [J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 32-43.
- 8 Chen Ling, Zhou JiFu, Wang Xu, et al. Nonlinear Wave Loads on High-Rise Pile Cap Structures in the Donghai Bridge Wind Farm[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2018, 28(3): 263-271.

Laboratory experiment on wave impact load on high-rise pile cap structures for offshore wind turbines

WEI Ming-zhu^{1,2}, ZHOU Ji-fu^{1,2}, WANG Xu¹

- (1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100190;
(2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100149,
Email: zhoujf@imech.ac.cn weimingzhu@imech.ac.cn)

Abstract: Aiming at practical requirements in engineering, this work is devoted to elucidate the characteristics of nonlinear wave force of a high-rise-pile-cap structure, which is the typical one in China, by means of laboratory experiment. Through 14 runs of experiments under different water depth for the overall structure and the piles without the cap, the wave impact load on the piles under the cap is demonstrated.

Key words: Offshore wind turbines; High-rise-pile-cap structure; Wave impact load