

· 港口 ·



波流作用下高桩码头动力响应试验研究*

毕建巍¹, 苏雷^{1,2}, 解立波¹, 张昱², 凌贤长^{1,3}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520;

2. 大连理工大学, 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:针对外海工程地质环境,以高桩码头为研究对象,设计波流作用下水槽试验方案,开展波流作用下高桩码头动力响应的试验研究,还原了高桩码头真实的使用环境,探讨高桩码头桩身内部响应差异,分析自由场与桩周土孔压和加速度的响应关系。结果表明:1)高桩码头各桩响应差异明显,顺波流方向桩身所受动水压力逐渐减小,桩身弯矩前排桩大于后排桩,中间桩大于两侧桩;2)面板位移和加速度呈周期性变化,扭转随波流作用逐渐减小;3)土层加速度和孔压随波流传播和埋深增加逐渐减小,群桩的存在会增大土层加速度、减小孔压;4)高桩码头设计时,应适当提高中间桩的强度,重视对表层海床土的加固。研究成果可为高桩码头的设计和维护提供一定的参考与借鉴。

关键词:波流作用;高桩码头;动力响应;液化场地;模型试验

中图分类号:U 656.1+13

文献标志码:A

文章编号:1002-4972(2023)02-0037-07

Experimental investigation of dynamic response of pile-supported wharf under wave-current actionBI Jian-wei¹, SU Lei^{1,2}, XIE Li-bo¹, ZHANG Yu², LING Xian-zhang^{1,3}

(1.School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: For the engineering geological environment in deep sea, a wave-current flume test scheme is designed for pile-supported wharf(PSW), and the experimental investigation on the dynamic response of PSW under wave-current action is carried out. The test really reproduces the operating condition of PSW, and the internal response difference of PSW is discussed, and the pore pressure and acceleration in the free field and soil layer around piles are analyzed. The results show that: 1) The responses of each pile in PSW are obviously different, and hydrodynamic pressure on pile decreases gradually along the wave-current direction. The bending moment on the front pile is greater than that on the rear pile, and the bending moment on the middle pile is larger than that on the bilateral pile. 2) The displacement and acceleration of deck change periodically, and the torsion decreases with wave-current action. 3) The acceleration and pore pressure of soil layer gradually decrease with the wave-current propagation and increase of the burial depth, the pile group increases acceleration of soil layer and decreases its pore pressure. 4) In the design of PSW, the strength of middle pile should be appropriately increased and the

收稿日期:2022-06-01

*基金项目:国家自然科学基金项目(42072310,51808307)

作者简介:毕建巍(1998—),男,硕士研究生,从事波流荷载下高桩码头动力特性研究。

通讯作者:苏雷(1986—),男,博士,教授,从事土动力学及岩土地震工程方面研究。E-mail:sulei@qut.edu.cn

reinforcement of surface seabed soil should be emphasized. The above research can provide a reference for the design and maintenance of PSW.

Keywords: wave-current action; pile-supported wharf (PSW); dynamic response; liquefiable ground; model test

随着全球经济一体化的发展，作为海陆交通运输枢纽的港口发展迅速，建设不断加快，向深海区域发展已成为我国港口码头建设的新方向。高桩码头因受力条件明确合理、波浪反射小等优点，相较于其它结构形式的码头，更适用于深海区域，但深海环境恶劣，波浪、水流复杂多变，波流共同作用对高桩码头的影响成为亟需解决的关键问题之一，得到了许多学者的关注。如徐伯勤^[1]对桩基在波流作用下的响应问题进行探讨，提出一种波流力的计算方法；季新然等^[2]通过模型试验验证了多向不规则波对大尺度群墩作用的计算方法，发现波浪方向分布对波浪力与群墩系数的影响；吕启兵等^[3]利用数值模拟研究不同排列的方桩组合对水流力分布规律的影响；Xu 等^[4]通过现场原位试验对粉质土海床的孔压响应进行研究；Wang 等^[5]进行波浪作用下单桩周围海床响应试验，发现孔压在一定深度内响应明显；常方强等^[6]研究了波浪作用下原状土与重塑土的孔压特性，发现土体固结程度越大，越不易液化；吕豪杰等^[7]利用圆筒试验研究了波浪周期、波压力和土体参数等对桩周土孔压分布的影响；Zhang 等^[8]对不规则波浪作用下单桩周围海床响应进行试验研究，发现不规则波浪引起的海床响应大于规则波；胡翔等^[9]利用数值模拟对比研究自由海床与单桩周围土体孔压响应，发现桩端土体孔压产生局部放大现象。

综上所述，目前学者有关近岸环境中的结构研究多以单桩为研究对象，对高桩码头的研究较

少，多考虑波浪作用而忽视了波流共同作用。鉴于此，本文设计了一套完整的高桩码头波流水槽试验，对波流作用下高桩码头的动力响应问题进行研究，分析高桩码头结构内部响应的差异性，总结高桩码头及周围土体响应的时间和空间变化规律。

1 试验概况

1.1 试验设备

试验在大连理工大学海岸和近海岸工程国家重点实验室抗震分室中地震-波流联合试验模拟系统中进行，见图 1。系统主要技术参数：水槽几何尺寸为 21.6 m×5.0 m×1.0 m(长×宽×高)，工作水深为 0.2~0.8 m；试验最大波高为 0.33 m，稳态波高误差小于 3%；试验波浪周期为 0.5~4.0 s，稳态周期误差小于 1%。采用 3.0 m×1.0 m×0.6 m(长×宽×高)的土箱作为海床容器。造波机和造流机位于水槽底部，为防止波浪经过土箱时发生破碎，使用光滑塑料板制作引水坡道、过渡段和流出段，见图 2。

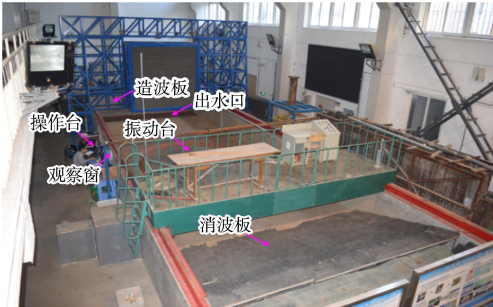


图 1 地震-波流联合试验模拟系统

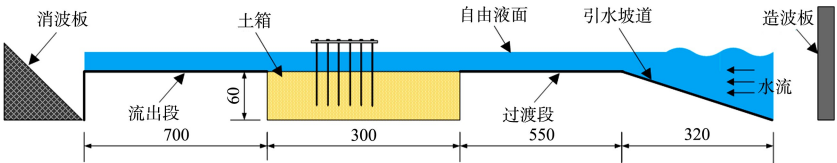


图 2 引水坡道 (单位: cm)

考虑到试验条件和试验的可重复性, 将复杂的近岸斜坡场地简化为表面水平、土层单一的饱和地基。试验采用福州砂作为试验用砂; 采用砂雨法分层进行饱和地基的制备, 并在完成后静置

24 h, 确保土层完全饱和。按典型高桩码头结构, 考虑试验条件等因素, 按 1:50 的相似比, 采用 6061 铝进行高桩码头模型的制作, 面板与桩采用螺栓连接, 模型尺寸见图 3。

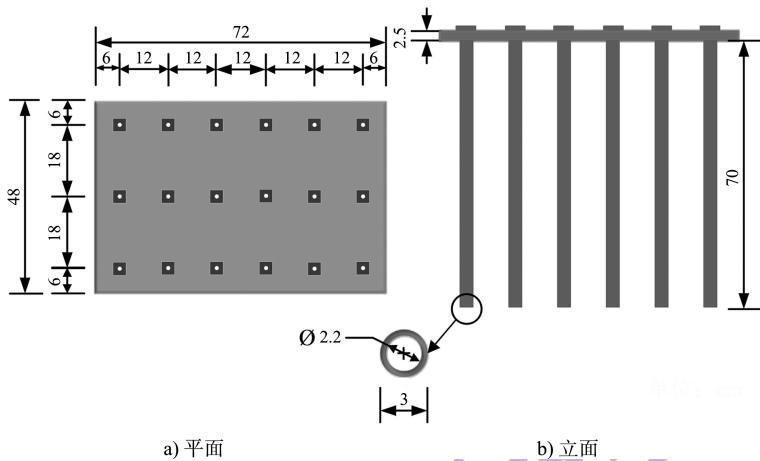


图 3 高桩码头模型尺寸 (单位: cm)

1.2 试验布置

试验时将土箱分为 2 个区域: 自由场区和高桩码头周围土体区, 之间留有足够距离, 可认为互不干扰。将高桩码头模型居中放置于土箱, 各桩入土深度 45 cm, 水中 15 cm, 露出水面 10 cm, 见图 4。试验时, 将防水应变片对称贴于桩 B1、

B2、E1 和 E2, 孔压传感器和加速度传感器埋置于自由场和桩 B2、E2 附近土层, 波压传感器位于桩 B2 和 E2 附近水深 0.1 m 处, 在面板的中部和角部布置加速度和位移传感器, 波高仪和流速仪架设在面板前 10 cm 处, 全方位检测高桩码头模型及周围土体的响应, 传感器具体布置位置见图 4。

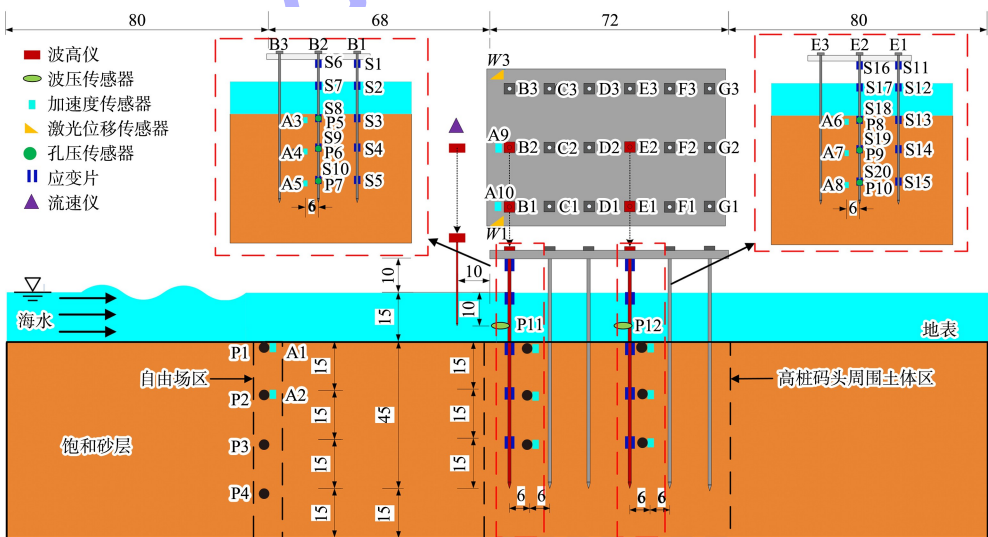


图 4 高桩码头模型与传感器布置 (单位: cm)

1.3 波流作用施加

为了充分研究波流作用下结构及周围土体的响

应, 应在不引起波浪破碎的前提下进行工况的选取。为保证波浪不发生破碎, 试验所施加的波浪参

数应满足以下条件之一：1) $H/L \leq 0.142 \tanh(kd)$ ；2) $H/d \leq 0.78$ 。其中： H 为波高； d 为水深； L 为波长； k 为波数。根据试验要求与试验能力，参考相关试验方案，试验时先施加波速 0.30 m/s 的水流，待流速达到要求并稳定后，再施加波高 4 cm、周期 1 s 的规则波激励。图 5 为预试验时实测波高与理论值对比，从中可以看出二者高度吻合，消波板与引水坡道起到了良好的作用，施加荷载符合试验要求。同时可以看出，群桩会造成波浪的反射，使得波高小幅增加。图 6 为试验中波浪和流共同作用时的实测波高，对比图 5 可以看出，流的加入会削弱波浪的波谷幅值和反射，同时会增强波峰的作用，但波峰的幅值和波浪周期不变。

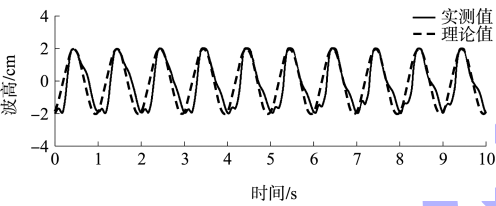


图 5 波高实测值与理论值对比

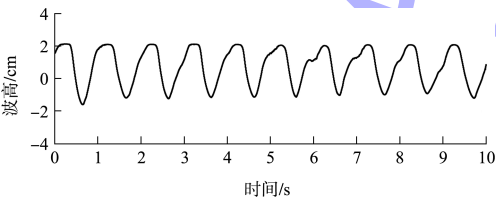


图 6 波流共用作用下实测波高

2 试验结果分析

2.1 动水压力

图 7 为桩 B2 和 E2 处所受动水压力时程。从图中可以看出，桩 B2 所受动水压力大于桩 E2。这可能是两个原因造成的：一是群桩阻碍了波流的传播，影响其传播速度；二是群桩的存在增强了波流对土层表面的冲刷作用，消耗了波流的能量。值的注意的是，桩所受动水压力曲线在其峰值处出现明显的毛刺，且这一现象在桩 E2 处尤为明显。这是由于群桩造成波浪在波峰处破碎导致的，且波浪和水流的耦合是一个复杂的相互作用，流速的变化导致波峰处的破碎更为明显。

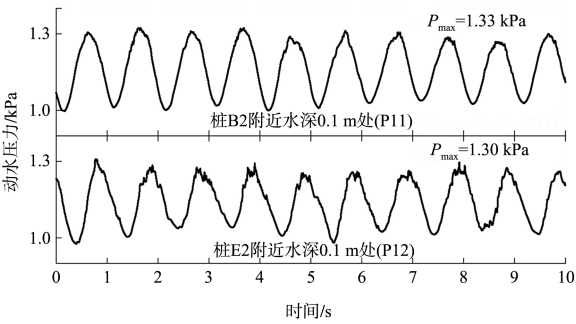


图 7 动水压力时程

2.2 码头结构响应

2.2.1 桩的弯矩

试验时，根据黏贴于桩身的应变片记录的应变值，按照弹性梁基本理论进行换算，得到桩 B2 和 E2 的弯矩时程，见图 8。由图可知，弯矩响应表现出以波流响应为主的谐波特征，但由于波流之间存在相互作用，导致弯矩响应并不是完全规则的正弦波。除水面位置桩身外，桩 B2 其余位置的弯矩最大值均大于 E2 桩，这是由于桩 B2 位于桩群最前排的中间列，受到波流作用的直接冲击，所受波流作用大于 E2 桩。同时，波流对桩 B2 附近土层的冲刷作用大于 E2 桩，造成桩 B2 附近土层的松散程度大于群桩内部土层，土层对桩的约束程度小，导致桩 B2 的弯矩大于 E2 桩。水面位置处桩身最大弯矩位于桩 E2，这是因为波流经过群桩时会产生衍射，由前排桩和边桩造成的波流衍射会叠加作用于桩 E2，从而增大了桩 E2 水面位置处的弯矩。

对比图 8a)、b) 可以发现，除位于水中的桩身外(埋深-0.20 m 和地表处)，群桩弯矩变化呈现出前排桩大于后排桩、中间桩大于两侧桩的变化规律。这是由于群桩的存在会对波流的传播造成衰减，阻碍波流的正常传播。同时，群桩的存在也会增强波流对土层的冲刷作用，消耗波流能量，减弱波流对后排桩的作用。由于波流经过群桩时会产生衍射，两侧桩产生的波流衍射会叠加作用于中间桩，一定程度上会增大中间桩的弯矩响应。对位于水中的桩身而言，其弯矩响应受到波流的直接影响，而群桩造成的波流衍射会破坏波流的稳定，导致水中桩身弯矩变化无明显规律。进一步对埋入土层中的桩身弯矩分析可知，中间

排桩的桩身受力更加均匀, 而两侧桩的弯矩在埋深 0.30 m 处较小, 说明波流对中间桩周围土层的影响深度大于两侧桩, 导致深处土层对两侧桩的约束作用较大, 从而减小了桩身弯矩的响应。

由上述分析可知, 高桩码头在实际使用时各桩的受力并不一致, 而是呈现出中间桩受到的波流作用大于两侧、前排桩大于后排桩的变化规律。因此, 在高桩码头设计时, 应关注中间桩的设计, 通过提高中间桩强度或其他方法, 增强其抵御波流冲击的能力。

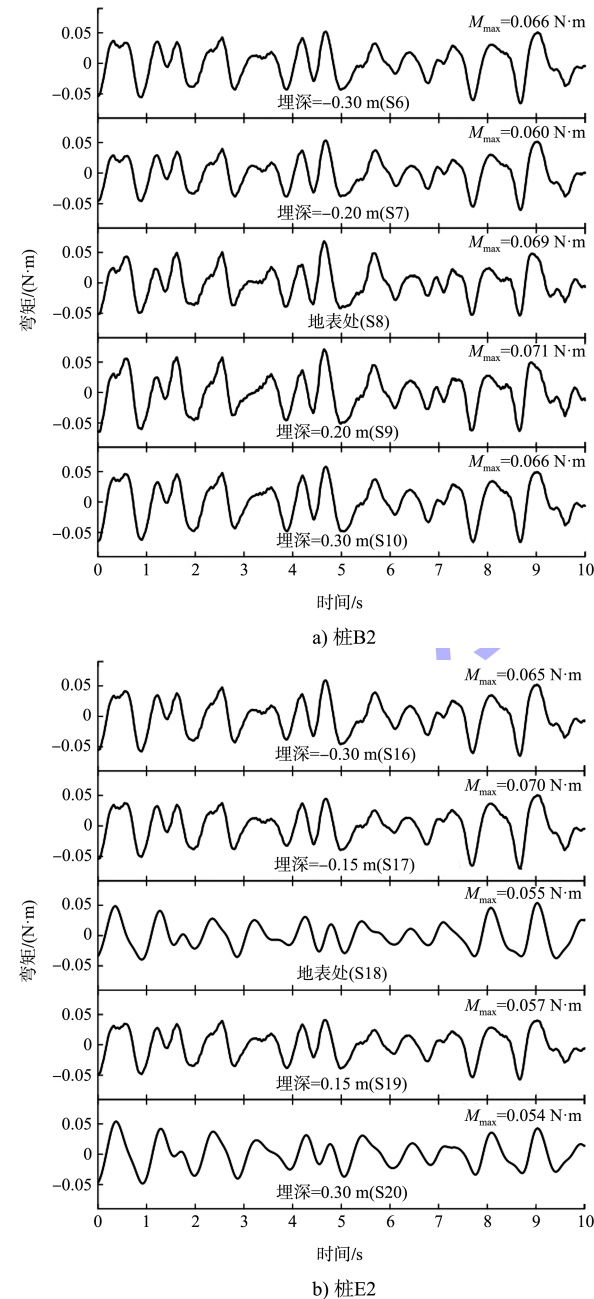


图 8 桩身弯矩时程

2.2.2 面板加速度和位移

图 9a) 为高桩码头模型的面板加速度时程。从图中可以看出, 面板中部加速度呈正弦规律变化, 而面板角部加速度在 0~6 s 时变化幅值和周期并不明显; 7~10 s 时, 幅值变大, 其周期规律性逐步显现。这说明由于群桩的阻碍, 导致经过群桩的波流随机产生绕射, 减弱波流对两侧桩的影响, 并造成结构的轻微扭转。随着波流的持续作用, 对表面土层的冲刷作用会减弱对群桩的约束, 增大面板角部加速度。值得注意的是, 随着波流的持续作用, 面板中部加速度响应减小, 与角部加速度响应的差异性变小, 这说明持续的波流作用减小了结构的扭转程度。

图 9b) 为高桩码头模型的面板位移时程。由图可知, 面板位移较小, 结构随波流的作用做周期性往复运动。这是由于模型的刚度大, 而施加的荷载相对较小, 同时由于顶部面板的约束, 会进一步增强结构的整体性, 减小结构的位移。进一步分析可知, 0~5 s 时, 面板两侧位移具有较高同步性; 5~10 s 时, 面板两侧位移存在一定的相位差。这是由于波流经过群桩时会产生随机绕流, 导致对两侧桩的作用并不相同, 造成面板两侧位移不同步, 产生轻微扭转。

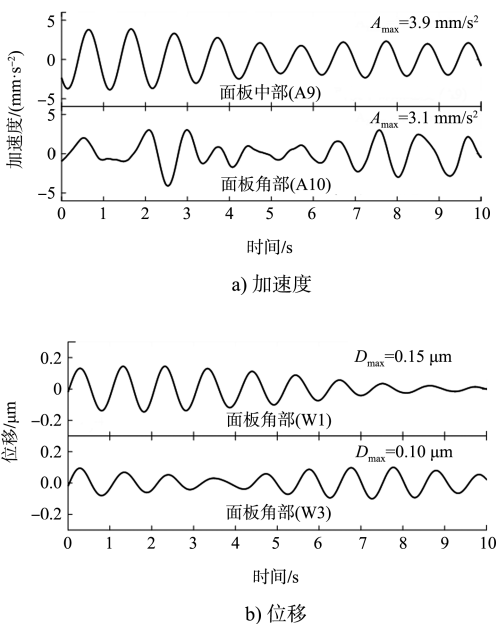


图 9 面板加速度和位移时程

2.3 土层响应

2.3.1 土层孔压响应

为了研究自由场和桩周土层孔压的时间和空间变化规律，图 10 给出了自由场与桩 B2、E2 附近土层孔压变化时程。结果表明：自由场和桩周土层孔压呈振荡分布，为瞬时孔压，未见明显的孔压积累，土层并未产生残余孔压。说明土层在波流的作用下松散程度加大，排水效果良好，未产生累积孔压。孔压的最大值和变化幅度随埋深的增加而变小。进一步分析可知，孔压随深度的增加衰减速率变缓。这是由于波流荷载作用于土层表层，其作用沿深度逐渐减弱，且土层内部存在的摩擦阻尼阻碍了循环压力沿竖向传播。

对比图 10a)~c) 可以发现，除桩 B2 附近土层表面孔压外，自由场土层孔压均大于同一埋深处桩附近土层孔压。这是由于波流作用时，群桩的存在会对周围土层造成扰动，改变土层原有的渗流路径，增大了土层内部的摩擦阻尼，减小了桩附近土层的孔压响应。对于位于迎水面的桩 B2，波流经过时会沿桩身爬升，增强其对桩周土层的作用。同时，群桩的存在也会增强波流对土层的冲刷，增大桩 B2 附近土层的孔压响应。对比图 10b)~c) 可以发现，桩 B2 附近土层孔压大于桩 E2，这是由于群桩的存在会对波流的传播造成衰减，使得波流绕流，影响其对桩 E2 附近土层的作用。

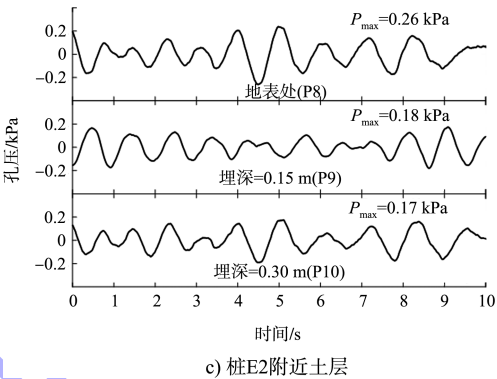
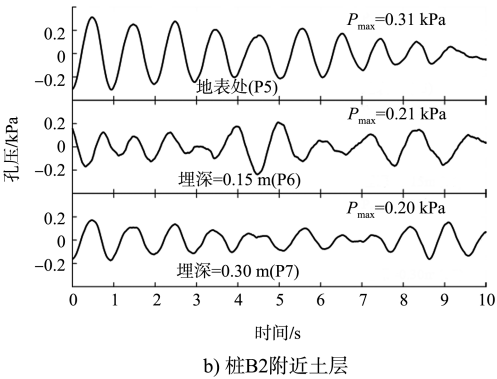
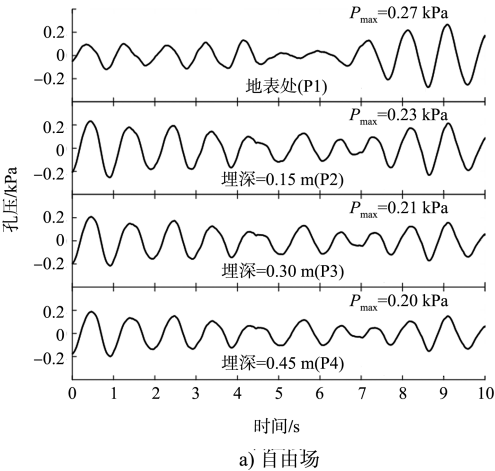


图 10 孔压变化时程

对自由场及桩周土层孔压的衰减速率分析可以发现，自由场浅层土孔压衰减 14.8%，而桩 B2 和桩 E2 附近浅层土孔压的衰减分别可达 33.3% 和 30.8%。这说明群桩的存在会加速桩周浅层土的孔压衰减。桩 B2 附近浅层土孔压衰减大于桩 E2，这是由于桩 B2 位于迎水面，波流对其表层土的冲刷作用明显，造成周围土体松散，孔压消散速率加快，导致孔压沿深度的衰减速率变快。

2.3.2 土层加速度

图 11 为自由场和桩周土层的加速度时程。由于波流对自由场土层影响较小，试验时仅在表层和 0.15 m 埋深处布置了加速度传感器。试验时，桩周土表层的加速度传感器被冲出而暴露于水中，所测加速度并非土层加速度，故此处对桩周土表层加速度不再讨论。自由场的表层土加速度传感器未被冲出，说明群桩的存在会增强波流对桩周土的冲刷作用，增强波流的挟砂能力。



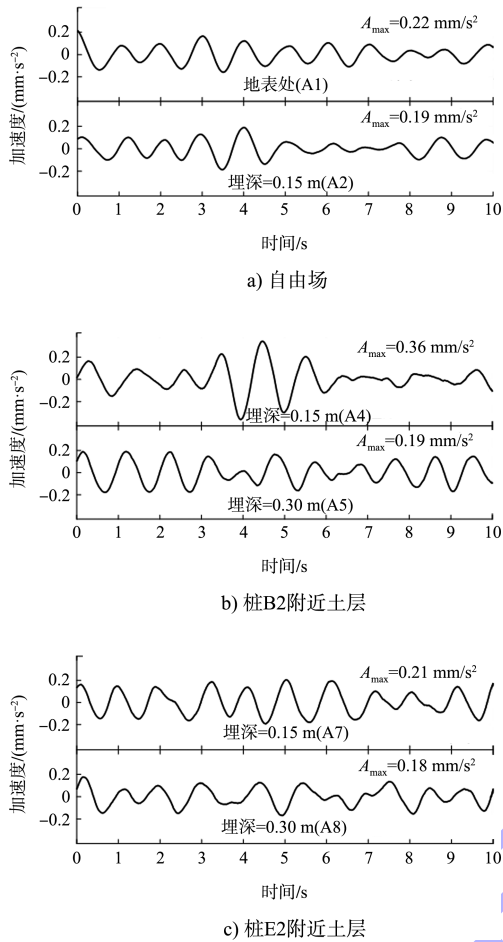


图 11 土层加速度时程

由图 11 可知,自由场土层加速度和桩周土层加速度的最大值均随埋深的增加而减小,这一规律在桩 B2 附近土层尤为明显,其土层加速度竖向衰减可达 47%。这是因为波流作用在土层表面,对深层土层的影响较小且流的作用也会减小波流对深层土层的作用。进一步分析可知,埋深 0.15 m 处桩附近土层加速度最大值随波流的传播迅速衰减,对比桩 E2 和 B2 附近土层加速度,衰减可达 41.7%。埋深 0.30 m 处桩附近土层加速度最大值衰减仅为 5%。这是由于桩 B2 位于群桩前侧,桩 E2 位于群桩内部,波流经过群桩时会消耗所含能量,对土层表面的冲刷也会损耗其部分能量,从而降低了桩 E2 附近土层加速度响应。

对比图 11a)~c) 发现,相同埋深处自由场土层加速度小于群桩附近土层加速度,说明群桩的存在会增强波流对群桩附近土层的扰动。同时,

由于群桩底部无嵌固,波流作用时会造成群桩轻微的往复运动,增大了群桩附近土层的扰动。

通过对土层孔压和加速度的分析可知,波流作用对埋深小于 0.15 m 处的土层作用明显,而对埋深大于 0.15 m 处的土层影响明显减弱。这是由于波流作用时,尤其是流的作用会增强对表层土的冲刷作用,减小对深层土的影响。因此,在高桩码头设计时,要重视对表层海床土的加固处理,尤其注意对前排桩周围海床土的加固,以防土层孔压过大而产生液化,影响高桩码头的正常使用。

3 结论

- 1) 高桩码头各桩响应差异明显,群桩的前排桩所受动水压力明显大于后排桩;除水中桩身外,其余位置处前排桩弯矩大于后排桩,中间桩弯矩大于两侧桩。
- 2) 高桩码头加速度和位移响应呈周期变化,波流作用会导致结构轻微扭转,随波流作用的持续,扭转程度会减小。
- 3) 波流作用对土层孔压和加速度响应沿深度和波流传播方向逐渐减小;对比自由场,群桩的存在会减小土层孔压响应,增大土层加速度。
- 4) 试验结果可为数值模型的验证提供基础,为高桩码头的设计和运营维护提供一定的参考与借鉴。高桩码头设计时,应提高前排中间列桩的强度,并重视对表层海床土的加固处理。

参考文献:

[1] 徐伯勤. 对作用桩基上的波流力计算中若干值得注意的问题的探讨[J]. 水运工程, 2008(10): 41-45.
[2] 季新然, 邹丽, 柳淑学, 等. 多向不规则波浪作用下群墩结构所受波浪力的实验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 238-243.
[3] 吕启兵, 杨斌, 刘明维, 等. 框架墩式码头结构绕流数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2014(6): 22-29.