

DOI: 10.11779/CJGE2024S10032

堆载引起岸坡土体与高桩码头相互作用机制试验研究

汪振¹, 戴启权¹, 张宇亭^{*1}, 蔡少咏²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津港集装箱码头有限公司, 天津 300456)

摘要: 码头后方堆场堆载会导致倾斜岸坡场地的侧向位移, 对码头基础设施安全构成挑战。以天津港典型高桩码头为背景, 基于大型土工离心试验平台, 探究了堆场荷载作用下岸坡场地的变形特性、码头位移和内力的分布规律。试验结果表明: 堆场堆载会导致岸坡出现显著的水平位移, 其主要位于后承台下方区域, 且随着距堆场距离的增加而逐步趋近于零; 码头后承台随堆场荷载的增加会产生显著的向海侧水平位移, 由此导致码头前后承台间距缩小进而增加碰撞风险; 后承台桩基在岸坡土体水平变形作用下其弯矩响应由桩顶至底部呈 S 型分布模式; 前承台桩基弯矩响应要显著低于后承台, 其峰值小于后承台桩基弯矩响应的 50%。研究结论可为高桩码头的破坏机制提供借鉴。

关键词: 离心模型试验; 高桩码头; 堆场堆载; 土体位移; 桩基内力

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0254-05

作者简介: 汪振(1993—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事土结构相互作用等方面的研究工作。E-mail: wangzhenSKG@126.com。

Experimental study on interaction mechanism between slope soil and pile-supported wharf subjected to yard loads

WANG Zhen¹, DAI Qiquan¹, ZHANG Yuting¹, CAI Shaoyong²

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. Tianjin Port Container Terminal Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: The back yard loads of a wharf can cause lateral displacements at sloping shoreline sites, posing a challenge to the safety of the infrastructures. With the engineering prototype of a typical pile-supported wharf in Tianjin Port area and based on a large-scale geotechnical centrifugal platform, the deformation characteristics of the shoreline site, the displacement and internal force of the wharf under the action of yard loads are investigated. The results show that the yard loads cause significant horizontal displacements of the slope soil. The horizontal displacement of the soil occurs mainly in the area below the rear platform, which converges to zero as the distance from the yard increases. With the increasing yard loads, significant seaward horizontal displacements of the rear platform are produced, resulting in a reduction in the distance between the front and rear platforms, which in turn increases the risk of collision. The pile foundation at the rear platform is subjected to the horizontal deformation of the slope soil, and the bending moment from the top to the bottom of the pile is distributed in an S-shaped pattern. The bending moment of the pile in the front platform is significantly lower than that of the pile in the rear platform, with the peak value being less than 50%. The findings of this study can provide reference for the damage mechanism of the pile-supported wharf.

Key words: centrifugal model test; pile-supported wharf; yard load; soil deformation; internal force of pile

0 引言

高桩码头是中国沿海及内河航道港口中广泛应用的典型结构, 通常包括有前承台和后承台结构, 其中前承台用于承受船舶的侧向荷载以及竖向的门机、货物和车辆荷载等, 因而桩基由承担竖向荷载的直桩和抵抗水平荷载的叉桩所构成。后承台主要承受竖向荷载, 因而其桩基仅由直桩所构成。在实际中, 受码头后方堆场长期或超量堆载, 以及施工时地基处理存在缺陷等不利因素影响, 导致码头堆场处地层出现变形

并传导至岸坡, 在岸坡土体内部产生附加应力。由于后承台在设计中本身并不考虑水平荷载作用, 因而岸坡土体的侧向变形或运动导致桩身的变形与开裂等破坏现象在工程中时有发生^[1], 威胁码头基础设施的正常使用及安全。

已有研究中针对于场地变形及其与桩基间相互作

基金项目: 天津市交通运输科技发展规划项目 (2022-43); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS20240401)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者 (E-mail: tkszyt@163.com)

用主要从数值模拟和物理模型试验两个方面开展, 廖雄华等^[2]以天津港高桩码头为工程背景, 建立桩基—岸坡土体有限元模型分析了堆场荷载引起的岸坡土体位移场及桩基的内力响应。刘现鹏等^[3]分析了土体蠕变下软土岸坡变形特性及其与高桩码头间作用机制。徐光明等^[4]基于离心模型试验复现了散货码头堆场地基在矿石堆载下发生的推移破坏。

本文以天津港地区典型高桩码头为工程背景, 基于离心机试验平台建立高桩码头与土体间三维物理模型, 探究堆场堆载下倾斜岸坡场地位移响应及其与高桩码头间相互作用机制, 以期高桩码头结构的工程设计及损伤评估提供参考。

1 试验方案设计

1.1 相似关系

本次试验在交通运输部天津水运工程科学研究院 (TIWTE) 超重力实验室中完成, 所采用的土工离心机平台为 TK-C500 型, 如图 1 中所示。离心机的有效旋转半径为 5 m, 设计可在载荷为 20 kN 时最大以 250 g (g 为地球重力加速度) 离心加速度旋转。土工离心机试验的基本原理是通过离心机平台以 N 倍重力加速度下旋转所形成的超重力场, 补偿原型在几何缩尺 N 倍后的自重应力, 从而达到模型与原型间的应力状态一致^[5]。本次试验的离心加速度比尺 N 设定为 80, 各主要物理量的相似比尺设计见表 1。

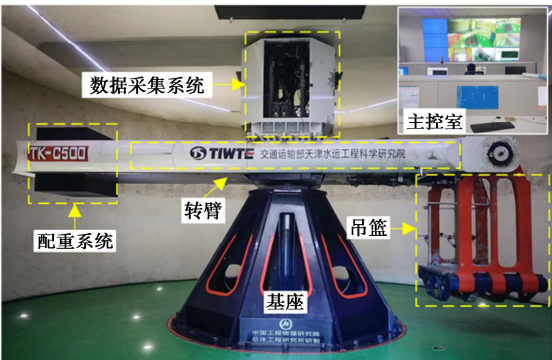


图 1 TK-C500 型土工离心机
Fig. 1 TK-C500 geotechnical centrifuge of TIWTE

表 1 离心试验物理量相似比尺设计

Table 1 Similarity laws adopted for physical quantities of centrifugal tests

物理量	相似比 (模型/原型)	物理量	相似比 (模型/原型)
加速度	N	质量	$1/N^3$
长度	$1/N$	应力	1
面积	$1/N^2$	应变	1
体积	$1/N^3$	弯矩	$1/N^3$
密度	1	抗弯刚度	$1/N^4$

1.2 码头模型结构制备

所选取的天津港典型高桩码头桩基原型为钢筋混凝土空心方桩, 截面尺寸为 550 mm×550 mm, 空心直径为 300 mm, 其抗弯刚度为 242.14 MN·m²。在离心机试验中, 模型桩以抗弯性能相似来进行设计。抗弯刚度的换算关系式为 $(EI)_p=N^4(EI)_m$, 其中 E 为桩基材料的弹性模量; I 为桩截面惯性矩, N 为试验的几何缩尺比, 下标 p 和 m 分别表示原型和模型。基于抗弯刚度的换算关系, 选取空心方形铝管来模拟桩基础。方形铝管的截面尺寸为 6 mm×6 mm, 壁厚为 1 mm。模型桩基的抗弯刚度为 5.98 N·m², 对应原型状态下为 244.94 MN·m²。由于本次试验的重点在于桩土间相互作用, 因而对码头的上部纵梁、横梁和面板作一体化设计, 以质量相似为设计原则, 选用厚度为 10 mm 的铝板。图 2 为高桩码头试验模型组成及尺寸设计。

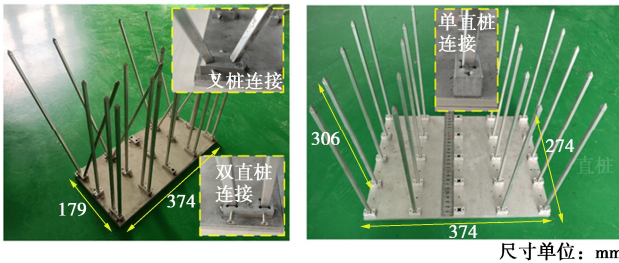


图 2 高桩码头结构组成及尺寸设计

Fig. 2 Structural components and dimensions of pile-supported wharf

1.3 模型布置与制作过程

图 3 展示了试验模型在箱体内的整体布置。模型箱体内部尺寸为 1.2 m×1.2 m×0.5 m。模型底部持力层为丰浦砂土层, 厚度为 454 mm, 桩基嵌入砂土层深度为 20 mm。模型上部为黏土层, 堆场位置处的最大厚度为 296 mm。黏土层采用高岭土制备。黏土层土体的参数由室内直剪与压缩试验获得。土体的密度为 1.81 g/cm³, 直剪黏聚力为 48.8 kPa, 内摩擦角为 10.7°, 压缩模量为 6.7 MPa, 含水率为 33.8%。

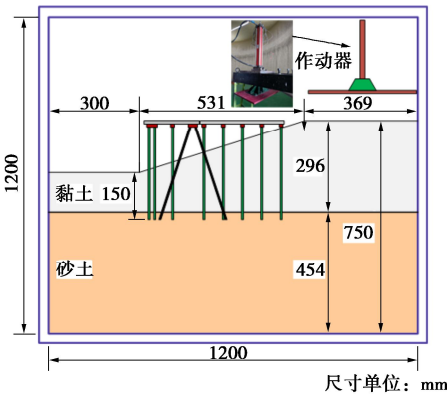


图 3 模型布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model layout

试验的制备主要包括 3 个步骤：①地层模型的制备，即砂土和黏土地基的制作；②高桩码头模型的安装；③模型箱体在离心试验平台的布置，包括传感器以及加载装置的安装测试。在以上 3 个步骤中，步骤②较为复杂。高桩码头是由数量众多的直桩与叉桩交叉组合而成，若提前预埋至土体中则难以精准定位。因而在试验中，采用了新的安装技术，具体如下：首先在岸坡土体中定位后承台直桩点位，随后采用略小的先导桩在每个点位打设导向孔，将组合的后承台模型采用橡皮锤沿导向孔击入岸坡土体中。在前承台的安装中，则需要首先在承台面板参照叉桩的角度开设导向孔，定位前承台面板后将叉桩由导向孔锤击至土体中。图 4 给出了试验模型的制备步骤。

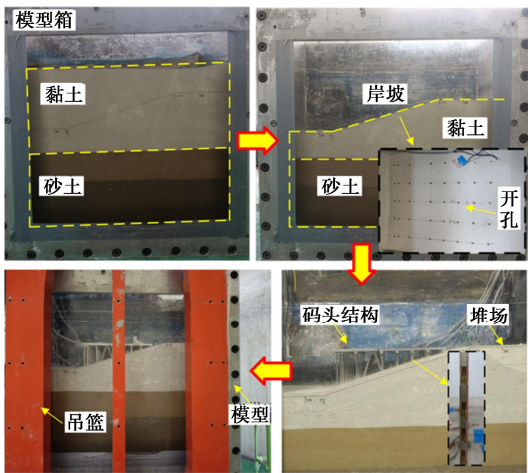


图 4 试验模型准备过程

Fig. 4 Preparation procedure of model tests

1.4 传感器布置与工况设计

本次试验采用的传感器包括有激光位移传感器和应变片桥路。激光位移传感器分别用于采集码头结构和岸坡土体的位移响应，其码头前后承台各布置 2 个分别采集水平位移和竖向沉降。岸坡处由坡顶至坡脚布置 4 个（即 P1 到 P4）用于采集岸坡的水平位移。应变片桥路共布置有 47 对，分别用于采集直桩的弯矩和叉桩的轴力。由于 H1 桩基最为接近堆场，因而应变片桥路的布设明显多于其他位置处桩基，共有 11 对。图 5 给出了模型中传感器的布置方案。此外，在整个加载过程中，模型箱体外部安装工业相机用于从视觉上记录模型整体的变形状态。

试验中采用液压加载装置在堆场处以位移控制加载，工况共包含 9 组，即 C1 到 C9，分别对应 1~9 mm 的堆场加载位移。由于在离心机运转提升加速度过程中地层及结构会出现一定沉降变形，因而需在模型沉降稳定后开展试验工况。

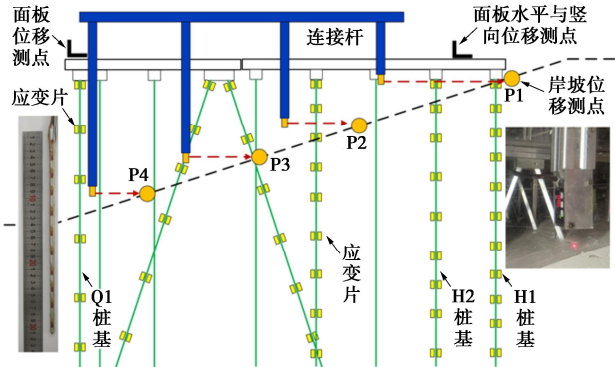


图 5 监测传感器布置图

Fig. 5 Layout of instrumentation

2 模型试验结果分析

2.1 宏观现象观测

在整个试验过程中，由工业相机所记录的模型最终变形状态如图 6 所示。分析图 6 可知，与初始状态相比，岸坡土体和码头后承台结构发生明显的水平位移。图 7 中给出了码头前后承台在堆场堆载下的位移变化。前承台与后承台在初始状态预留有 5 mm 间距模拟施工缝。受岸坡土体的水平位错影响，后承台与前承台间距呈明显减小趋势，由最初的 5 mm 减小至最终状态下的 2 mm。此外，由图 7 可以明显看出，在码头后承台和岸坡顶部区域下方的地层出现一定的竖向沉降，沉降量为 3~5 mm。可以推测在离心加速度由 0 提升至 80g 过程中，码头结构的离心力逐步增加，进而通过桩基作用于其周围地层，增加了码头结构下方地层的竖向变形。

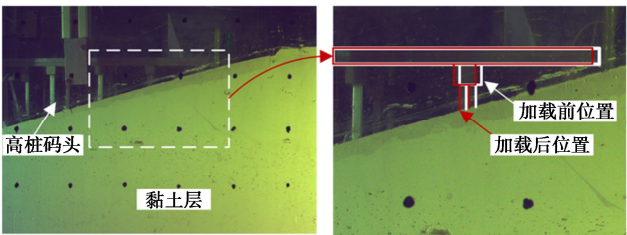


图 6 模型整体变形侧视图

Fig. 6 Side view of model deformation

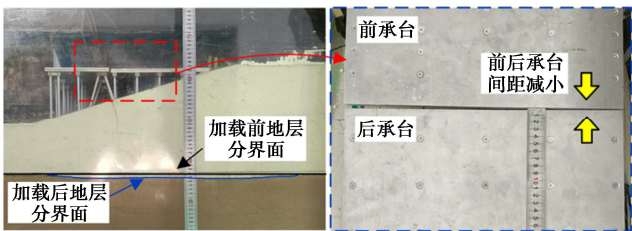


图 7 码头结构变形图

Fig. 7 Deformations of pile-supported wharf structures

2.2 岸坡土体位移

图 8 给出了岸坡土体水平位移随加载过程的变化曲线, 其中测点 P1~P4 具体位置如图 5 中所示。位移为正值表示测点与激光位移计之间距离减小, 反之则增大。随堆场处堆载的增加, 在 P1 和 P2 处土体水平位移呈单调递增趋势, 而 P3 和 P4 处的土体水平位移则基本未受到岸坡堆载影响。由此可知, 堆场处的堆载对后承台下方区域岸坡土体变形影响明显, 但对前承台下方区域岸坡土体的影响较小。此外, 当动作器卸载后, 可以看出岸坡土体在 P1 和 P2 处已出现明显的水平残余变形。

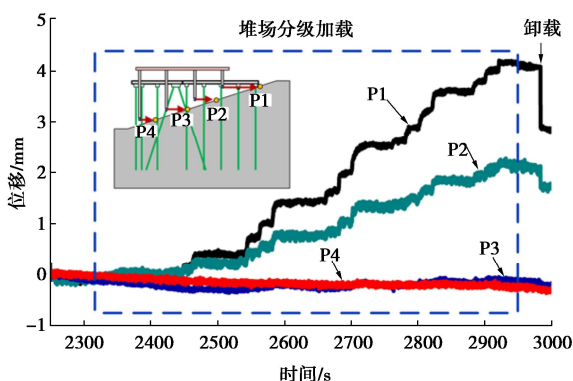


图 8 岸坡土体水平位移变化

Fig. 8 Variation of horizontal movement of soil in slope area

2.3 码头结构位移

码头结构整体位移随加载过程变化曲线如图 9 所示。后承台的水平位移要明显大于其他测点。前承台水平位移略有增加, 但最终位移量小于 1 mm。前承台与后承台的竖向沉降均不明显。前后承台的位移变化主要受到岸坡土体的影响。岸坡土体的运动会由嵌入其中的桩基传导至上部结构, 导致码头发生整体侧移, 而后承台水平位移显著大于前承台则会导致两者间施工缝间距的缩小进而增加碰撞风险, 与试验中所观测到的宏观现象变化一致。

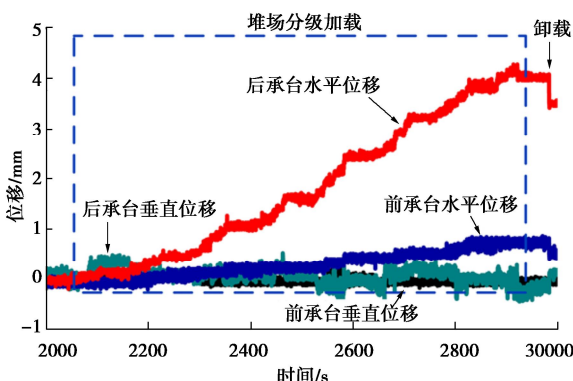


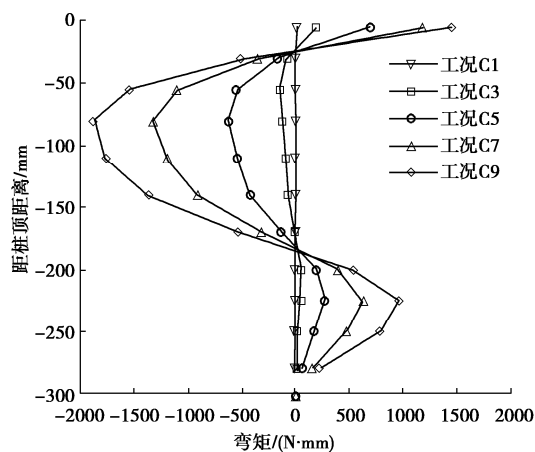
图 9 码头结构位移变化

Fig. 9 Variation of movement of pile-supported wharf

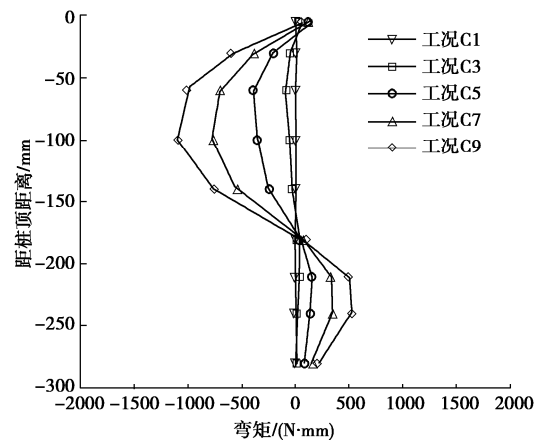
2.4 桩基内力响应

选取后承台不同桩基沿深度方向的弯矩响应分析

其变化规律, 如图 10 中所示, 弯矩为正表示桩基在面向堆场侧受拉而向海侧受压。H1 桩基与 H2 桩基的弯矩响应沿深度方向的分布规律类似, 由桩顶至桩底均呈 S 型变化趋势。在距桩顶 100 mm 左右处产生最大负弯矩, 且在距桩顶超出 170 mm 距离时由负弯矩转变为正弯矩, 并在距桩顶 200~250 mm 间出现明显的正弯矩峰值。此外, 与 H2 桩基相对比, H1 桩基在桩顶处产生明显的正弯矩, 且峰值超出桩基底部的弯矩响应峰值, 在 C9 工况达到 1448.54 N·mm。



(a) 后承台 H1 桩基



(b) 后承台 H2 桩基

图 10 后承台桩基弯矩分布

Fig. 10 Distribution of bending moment along piles in rear platform

为进一步明晰后承台桩基内力响应机理, 图 11 绘制了桩土间相互作用示意图。倾斜岸坡处的土体在其后方堆场堆载影响下会发生明显向海侧水平位移, 地层变形作用于嵌固其中的码头桩基进而导致桩基在其中上部区域受明显的水平推力作用, 进而产生明显的负弯矩响应。此外, 由于桩基在顶部与面板通过桩帽采用螺栓固接, 而桩基的底部则嵌固于砂土持力层。因而桩基受到两端边界的影响, 在其顶部和底部会产生明显的正弯矩响应。

前承台 Q1 桩基沿深度方向的弯矩响应变化规律如图 12 中所示。由图 12 分析可知, 桩基弯矩由桩顶

处到深度为 160 mm 位置处呈单调递增趋势,并在出现负弯矩峰值后逐步演变为正弯矩,在桩基底部产生正弯矩峰值。可以发现,Q1 桩基弯矩峰值出现在桩与岸坡土体表面的相交位置。推测是由于 Q1 桩基接近于坡脚,土体表面的稳定性较差导致产生一定的水平向位错,进而作用于桩身产生了弯矩响应。与后承台桩基的弯矩响应相对比,可以看出前承台 Q1 桩基弯矩响应的峰值要显著小于后承台。以 C9 工况为例,前承台 Q1 桩基负弯矩响应峰值分别为后承台 H1 和 H2 桩基响应峰值的 28.8%和 49.5%。

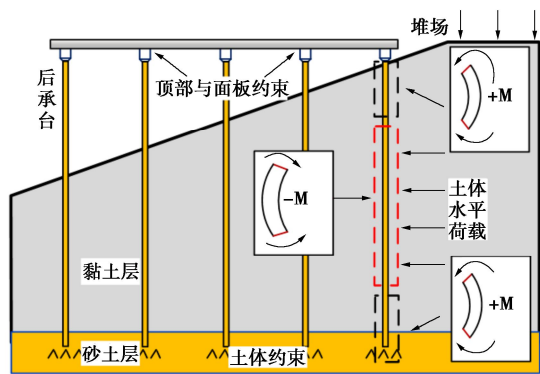


图 11 岸坡土体与桩基相互作用示意

Fig. 11 Schematic diagram of interaction between slope soil and piles

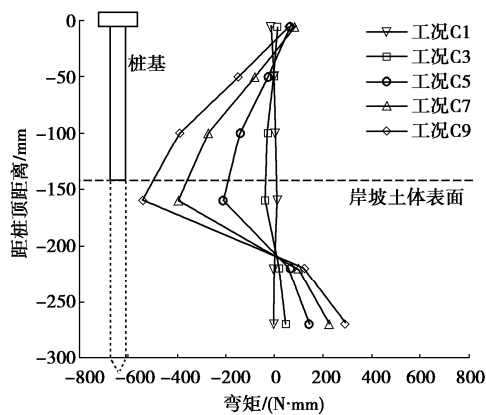


图 12 前承台 Q1 桩基弯矩分布

Fig. 12 Distribution of bending moment along Q1 pile in front platform

3 结 论

借助离心试验平台开展堆场堆载下码头基础设施响应特性研究,揭示了岸坡土体侧向变形、码头结构整体位移特性以及桩基弯矩响应规律,分析了高桩码头与土体变形间相互作用机制,得到以下 3 点结论。

(1)堆场堆载会在后承台下方区域的倾斜岸坡处地层产生显著向海侧水平位移,并进一步作用于埋地

桩基,导致码头结构的整体位移。后承台水平位移要显著大于前承台进而增加两者间的碰撞风险。

(2)受岸坡地层水平位移影响,后承台在靠近堆场处桩基弯矩响应由顶部至底部呈“S”型变化规律,且正弯矩和负弯矩峰值分别位于桩顶以下 230, 100 mm 附近。受桩顶与面板固结约束的影响,后承台在靠近堆场的第一根桩基顶部产生明显正弯矩,易于导致其与桩帽连接处的损伤。

(3)前承台桩基弯矩在其与岸坡表面相交位置附近达到峰值,为设计中的薄弱位置。在堆场堆载下,前承台桩基的弯矩响应要显著低于后承台桩基,其响应峰值小于后承台桩基的 50%。

参考文献:

[1] 魏汝龙, 王年香, 杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 38-49. (WEI Rulong, WANG Nianxiang, YANG Shouhua. Interaction between pile-supported pier and bank slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 38-49. (in Chinese))

[2] 廖雄华, 张克绪. 天津港高桩码头桩基—岸坡土体相互作用的数值分析[J]. 水利学报, 2002, 33(4): 81-87. (LIAO Xionghua, ZHANG Kexu. Numerical analysis of pile-soil interaction in long-piled wharf of Tianjin Port[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(4): 81-87. (in Chinese))

[3] 刘现鹏, 韩 阳, 刘红彪. 土体蠕变作用下高桩码头变形分析方法研究[J]. 水道港口, 2016, 37(4): 432-438. (LIU Xianpeng, HAN Yang, LIU Hongbiao. Research on analysis methods for deformation of high-pile wharf under effect of soil creeping[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(4): 432-438. (in Chinese))

[4] 徐光明, 王年香, 顾行文, 等. 模型箱约束对大变形破坏离心模型试验影响初探[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 232-242. (XU Guangming, WANG Nianxiang, GU Xingwen, et al. Preliminary study on influences of model container constraint on large-deformation failure behaviors by centrifuge modeling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 232-242. (in Chinese))

[5] 包承纲. 我国岩土离心模拟技术的应用与发展[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 55-66, 71. (BAO Chenggang. Application and development of centrifugal modeling technology for geotechnical engineering in China[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2013, 30(11): 55-66, 71. (in Chinese))

(编校: 孙振远)