

陆域堆载对框架码头桩基弯矩影响的试验研究

赵迪, 王俊杰, 黄诗渊

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 陆域堆载对码头岸坡及框架码头桩基受力变形均会产生一定的影响,为了探究堆载时框架码头桩基弯矩沿桩长的分布规律,以三峡库区的砂泥岩混合填料为试验土料,设置13级陆域堆载荷载进行模型试验,测定桩身弯矩,分析其随陆域堆载值增加的变化规律及产生机理。结果表明,随着陆域堆载值的增加,码头桩基弯矩值增加,最大值发生在最后侧桩位,在设计配筋计算中需注意桩后受压,桩前受拉;陆域堆载引起桩基产生弯矩的主要原因有:土体水平侧向应力、桩侧摩阻力;仅考虑水平荷载作用引起桩基弯矩时,在较高桩位半理论值与试验值吻合较好,但在靠近嵌固端则因未考虑桩侧摩阻力引起较大偏差。

关键词: 框架码头;陆域堆载;排架结构;桩基弯矩;砂泥岩混合填料

中图分类号: U656.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)05—0032—05

Experimental Study on Influence of Heaping on Bending Moment of Frame Wharf Pile Foundation

ZHAO Di, WANG Junjie, HUANG Shiyuan

(National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Heaping will have influence on the stress-strain of wharf bank slope and the pile foundation. In order to explore the influence of the bending moment on the pile foundation for frame wharf, sandstone and mudstone mixed filler from the three gorges reservoir area was used as the test soil, and 13 level heaping load was set up for model test. Bending moment of pile was measured, the change rule and mechanism of pile bending moment were analyzed. The results show that the bending moment of wharf pile foundation increases obviously with the heaping. The maximum bending moment occurs at the last side pile position. It is necessary to pay attention to the back compression and front tension of the pile in the design of reinforcement calculation. The main reasons caused bending moment of pile foundation are horizontal lateral stress of soil and lateral friction of pile. The theoretical and experimental bending moment are in good agreement at the high pile position but in large deviation near the fixed, because only the horizontal load is considered, the lateral friction resistance of pile is ignored.

Keywords: frame wharf; heaping; bent structure; bending moment; sandstone-mudstone particle mixture

码头陆域堆载对桩基的作用是典型的被动桩^[1-2]问题,堆载作用引起土体的竖向沉降、竖向附加应力,土体内应力重分布,产生水平侧向附加应力及水平的位移场。由于桩基的存在,两者相互影响,土体内出现遮帘效应^[3]与土拱效应^[4],桩身受到土体的“挤压”而产生一定的侧向荷载及变形。该问

题较为复杂,若处理不当,将会造成码头产生较大的受力变形而影响正常使用,甚至结构破坏,如超载引起长江下游某件杂货码头相邻引桥较大水平位移^[5],连云港基桩工程的倾斜及断裂^[6]。

针对堆载问题引起的桩基受力变形问题,抗滑桩^[7]、桥梁桩基^[8]、建筑桩基^[9]及码头桩基均有学

者研究,但是针对码头桩基的研究较少。近五年来主要有刘泓江^[10]运用 C 语言程序,组合运算了包含堆货荷载在内的荷载进行架空直立式码头结构内力计算,得到了最不利的荷载工况组合。叶晨茂^[11]分析了“四跨五桩柱”架空直立式码头可能出现的包含货场堆载在内的荷载工况,并针对平面钢架计算了不同的组合,提出了最不利荷载工况组合。王晓龙^[12]通过物理模型试验与数值模拟分析了岸坡土体为砂土及砂泥岩混合料时,堆载条件下单排架桩基的弯矩及轴力分布规律。周末等^[13]通过 FLAC^{3D}探讨了堆载过程中,分离卸荷式板桩码头桩基的受力变形特性,以及码头桩基结构上土压力的分布规律,并与原型观测及离心模型试验结果对比验证了模拟方法的合理性。

综上所述,陆域堆载对码头岸坡土体的稳定性及应力状态产生一定的影响,现有研究针对考虑堆载影响如何改变或影响框架码头桩基弯矩特性研究较少。因此,本文进行不同陆域堆载荷载对桩体弯

矩影响试验模拟,设计 13 级不同堆载荷载,探究码头结构段桩身弯矩的影响。

1 试验模型的建立

1.1 试验设备

本实验采用模型槽尺寸为 4.0 m(长)×2.0 m(宽)×2.0 m(高)的自制港工结构地基多功能实验模型系统完成,在试验中框架码头桩基上贴 128 片 BX120-5AA 型应变片,为了测量计算桩基内力,应变片沿截面对称布置。

1.2 试验材料

根据三峡库区典型的地质条件,填方材料通常采用砂泥岩混合料,根据对其抗剪强度^[14]、变形^[15]、水力梯度^[16]等物理力学特性^[17]的研究,本试验选取砂岩与泥岩质量比 8:2 拌和后填筑岸坡,测试其物理力学参数如表 1 所示。框架码头选用 Q235 普通碳素钢无缝钢管进行焊接模拟,钢管壁厚 $\delta = 3 \text{ mm}$,外径 $\varphi = 89 \text{ mm}$,弹性模量约为 $E = 2.04 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。

表 1 砂泥岩混合料物理力学参数

不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	含水率 /%	填筑密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	填筑干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	
					天然抗剪强度	饱和抗剪强度	天然抗剪强度	饱和抗剪强度
7.88	2.89	8.22	1.73	1.60	29.63	19.59	32.15	28.57

1.3 试验模型

试验岸坡土体分层填筑并压实,形成 1:2.6 的稳定边坡,码头框架采用 3 榀排架,共计 12 根桩基焊接于模型槽底部,桩基编号如图 1 所示。

1.4 陆域堆载方案

堆载采用自行研发的岩土地基相互作用模型试验系统中竖向加载系统分级加载完成,在竖向千斤顶下通过木板及钢板形成垫层,将千斤顶所施加的荷载均匀分布到整个坡顶堆载区域,最大堆载荷载为 325 kN,共分 13 级加载,每级荷载 25 kN,加载之前先对应变采集系统进行检测平衡,读取初始土压力盒读数,然后进行分级加载,每级荷载加载完成后,待土压力盒读数及电阻应变片数据稳定后进行采样。

2 模型试验结果

桩体的弯矩,以 y 轴负方向为+,正方向为-。试验模型由三个排架结构组成,其中两侧边排架 B 与 C 结构对称,因此在中排架 A 及侧排架 B 上布置应变片测量其弯矩分布。

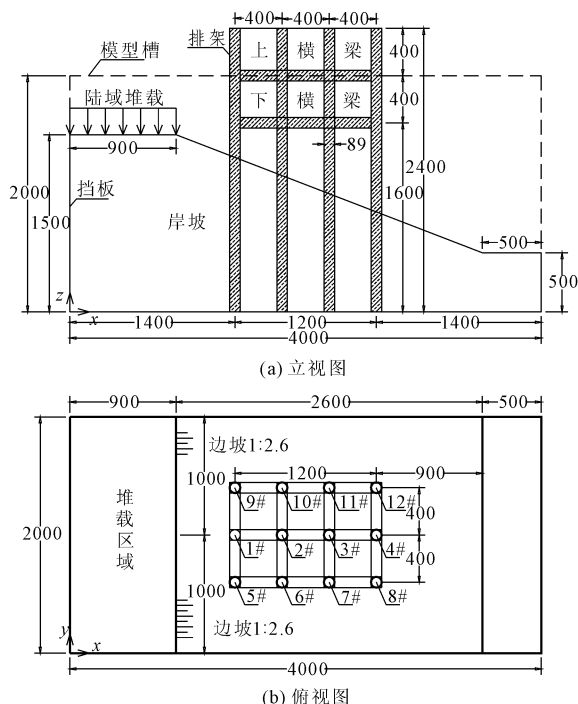


图 1 试验结构图(单位:mm)

2.1 中间排架 A 桩基弯矩

中间排架 A 在陆域堆载时的弯矩如图 2 所示。

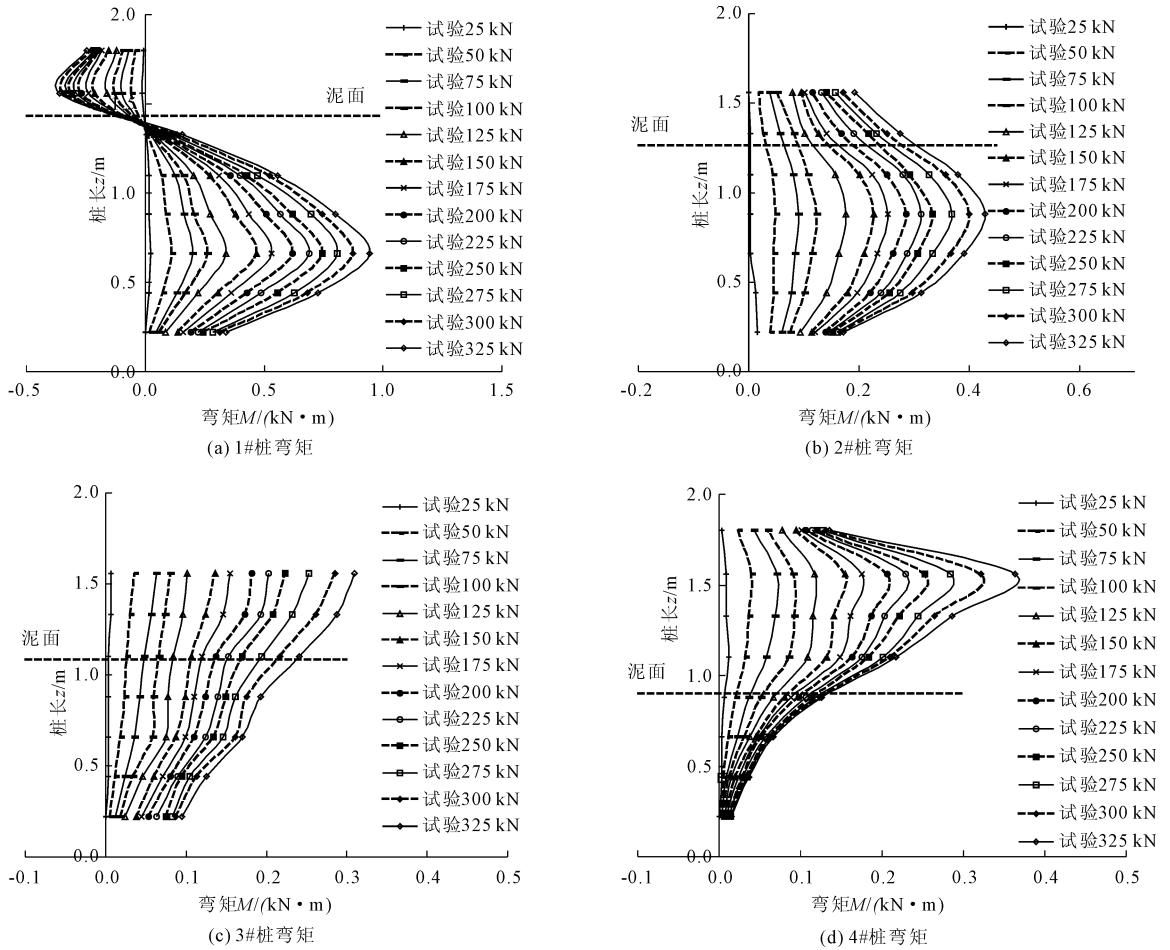


图 2 陆域堆载时中排架 A 各桩弯矩图

由图 2 可知,陆域堆载对桩体弯矩有一定的影响,当陆域堆载值较小时,桩上弯矩较小,沿着桩长变化较小,而随着陆域堆载值的增加,桩体的弯矩也逐渐增大,沿着桩长方向分布差异性越大,以正弯矩为主,有少量的负弯矩;1#、2#、3#、4#桩最大弯矩发生位置分别为 0.66 m、0.88 m、1.56 m 及 1.56 m 高程,大小依次为 0.944 kN·m、0.428 kN·m、0.310 kN·m、0.363 kN·m,分别为 1#桩的 100%、45.3%、32.8%、38.4%;说明在排架结构中最大弯矩发生在最后侧桩位,其余桩位不超过其 1/2。在设计配筋计算中需注意发生弯矩最大值的位置也从横梁以下 2/3 横梁到基岩面桩长逐渐过渡到横梁位置,主要为桩后受压,桩前受拉。

2.2 中排架 A 弯矩与侧排架 B 弯矩对比

绘制在堆载 13 级荷载时桩基承受最大弯矩时的分布曲线如图 3 所示,进行对比分析。

由图 3 可知:5#、6#、7#、8#桩基上的弯矩分别分布规律与 1#、2#、3#、4#桩基一致且略大,说明侧排架上桩基的弯矩更大。将各桩基在第 13 级荷载时

桩上的弯矩最大值进行比较,采用(侧排架弯矩最大值 - 中排架弯矩最大值)/侧排架弯矩最大值 \times 100% 作为对应位置桩基弯矩最大值的偏差率,计算结果如表 2 所示。

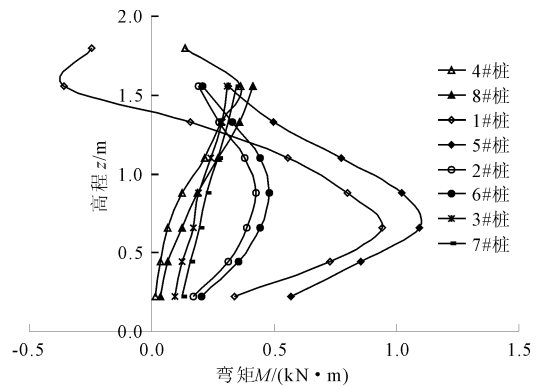


图 3 陆域堆载 13 级时各桩弯矩对比图

由表 2 可知:侧排架弯矩与中排架弯矩偏差在 10.448% ~ 13.679% 之间,分析其主要原因在于:(1)排架结构的排距为 0.4 m,而侧排架距模型箱侧壁的距离为 0.6 m,在承受荷载时,中间排架由于

桩距较近,产生土拱作用与侧排架一起承受来自土体的水平侧向压力,而在侧排架上,来自模型箱边壁一侧的土压力均由侧排架承担;(2)在填筑过程中,由于桩基的存在,使得填筑质量控制不均匀。

表 2 各桩弯矩最大值对比

排架位置	弯矩最大值/(kN·m)			
中排架	0.944(1#)	0.428(2#)	0.310(3#)	0.363(4#)
侧排架	1.094(5#)	0.482(6#)	0.346(7#)	0.415(8#)
偏差/%	13.679	11.071	10.448	12.448

2.3 桩身弯矩产生的机理分析

在陆域堆载时如何引起桩身上的弯矩呢?原因分析如下:岸坡土体在陆域堆载作用时,会产生竖向变形,土颗粒之间相互挤压,产生水平侧向变形及侧向应力,随着陆域堆载值的不断增大,这种水平附加应力值也越大,引起的地基土体的变形就越大。但是码头框架结构为超静定结构,其变形较小,一方面在土体水平侧向压力传递过来时,会挤压码头桩基,作用于水平荷载在桩基上,而桩基阻碍土体变形,对其变形起到约束作用,水平荷载作用下,桩基产生弯矩的作用;另一方面,土体沉降较大,但是桩前后土体沉降量存在差别,即存在侧摩阻力的差别,使得桩基产生一定的弯矩作用。

综上所述,陆域堆载引起码头桩基弯矩是岸坡土体内水平侧向土压力及竖向的侧摩阻力共同作用的结果。

3 侧向土压力作用下桩身弯矩分析

在试验中测试了桩前后的侧向土压力,并用两者之差作为作用于桩基上的水平荷载,当陆域堆载 13 级荷载时,作用于中排架 A 上的荷载大小如表 3 所示。

表 3 陆域堆载 13 级时作用于中排架上的水平土压力

高程/m	水平土压力/kPa			
	1#桩	2#桩	3#桩	4#桩
0.10	21.37	3.79	2.97	2.07
0.35	32.73	10.87	3.50	1.38
0.60	35.19	14.18	4.62	—
0.85	23.66	6.89	—	—
1.10	16.82	—	—	—

将两测点间的水平荷载作为直线荷载进行简化,泥面处竖向附加应力较小,而桩基底部受到模型

槽底部约束无侧向变形,因此将两处水平荷载作为 0 kPa,带入排架中进行超静定结构计算求解,得到 1#桩基半理论求解值与试验值进行对比如图 4 所示。

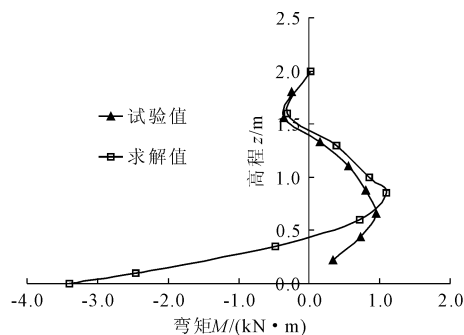


图 4 陆域堆载 13 级时 1#桩试验值与求解值对比

由图 4 可知,在桩基 0.85 m 高程以上,试验值与求解值规律类似,大小相当,但是在 0.85 m 高程以下,求解值较试验值而言,出现了较大的逆时针弯矩,偏差较大,分析其主要原因在于使用结构力学方法进行求解时,忽略了土体对桩基的竖向荷载及造成的弯矩,主要有两点:

(1) 一是侧向变形后会产生较大的弯矩。在框架码头桩基承受土体传递来的水平推力后,有向前的位移,取单桩的变形放大进行分析,如图 5 所示,变形后的桩基不仅受到水平土压力的作用,而且变形后的桩基上还有竖向土压力的作用,堆载等引起的竖向压力引起桩基弯矩为顺时针方向,与水平荷载引起的逆时针方向弯矩是相反的,起到了相互抵消的作用,桩基的水平变形越大,越靠近桩基底部,竖向荷载越大,这部分作用产生的影响就越大。

(2) 二是侧摩阻力的影响巨大。在承受陆域堆载后,竖向应力增加,致使土体向下发生沉降而在桩上变形较小,产生侧摩阻力的作用,并且在桩后侧产生较大的变形,摩阻力较大,如图 6 所示,在桩前受到桩的阻拦作用,土体的沉降变形是极小的,产生了较小的摩阻力,因此也会产生一顺时针弯矩,抵抗水平荷载引起的桩底弯矩,从而减小桩底产生的弯矩值。

因此仅用水平向的土压力荷载计算桩基的弯矩是不全面的,造成了截面较大的逆时针弯矩,该弯矩是顺时针弯矩值的 3 倍多,并且拉压方向产生变化,用此弯矩进行结构计算及配筋会造成设计的极大浪费,试验值更接近于实际情况。

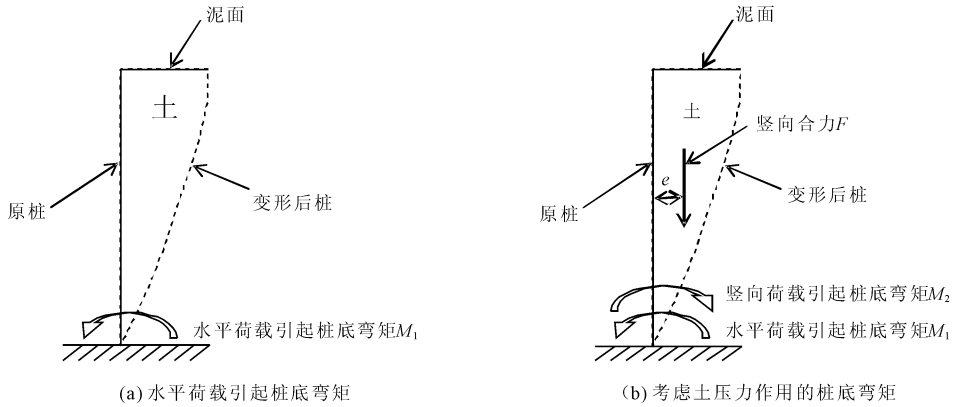


图 5 桩变形后竖向应力产生弯矩机理图

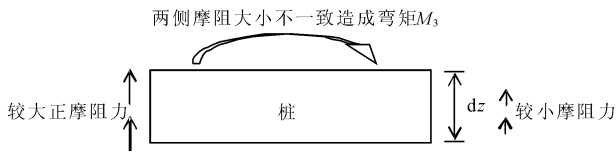


图 6 侧摩阻力造成桩基弯矩变化机理图

4 结论

文章对陆域堆载时框架码头桩基的弯矩进行了大型物理模型试验,结果表明:

(1) 码头桩基的弯矩值随着陆域堆载值的增加而增加,最大弯矩发生在最后侧桩位,其余桩位不超过其 1/2。在设计配筋计算中需注意发生弯矩最大值的位置也从横梁以下 2/3 横梁到基岩面桩长逐渐过渡到横梁位置,主要为桩后受压,桩前受拉。

(2) 在陆域堆载过程中,引起桩基产生弯矩的主要原因有:土体水平侧向应力、土体桩侧摩阻力。

(3) 仅考虑水平荷载作用引起桩基弯矩时,在较高桩位得到半理论解与试验值吻合较好,在靠近嵌固端则因为未考虑桩侧摩阻力引起的弯矩出现较大的偏差。

参考文献:

- [1] Basu D, Salgado R, Prezzi M. Analysis of laterally loaded piles in multilayered soil deposits[J]. Joint Transportation Research Program, 2008.
- [2] Ti K S, Huat B B K, Noorzaei J, et al. Modeling of passive piles - an overview [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 14: 1-22.
- [3] 梁发云,姚国圣,陈海兵,等. 土体侧移作用下既有轴向受荷桩性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报 2010, 32(10): 1603-1609.
- [4] 年廷凯,徐海洋,李东晨,等. 超载作用下边坡-抗滑桩体系稳定性及土拱效应研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 177-182.

- [5] 徐静文,郭 壮,李 致,等. 基于堆场超载的引桥损伤检测与加固方案探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 109-114.
- [6] 王晓军. 连云港基桩工程倾斜事故及对策分析[J]. 江苏建筑, 2016(1): 98-100.
- [7] 朱 泳,朱鸿鹄,张 巍,等. 抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 833-840.
- [8] 李鹏琳,谢永利,付兵先,等. 软土地基堆载对桥梁桩基变形影响的研究[J]. 公路交通科技, 2017, 13(3): 195-197.
- [9] 杨晓美,杨晓斌. 软土区不平衡堆载下桩基负摩阻力的数值模拟研究[J]. 国防交通工程与技术, 2014, 12(3): 29-31.
- [10] 刘泓江. 带嵌岩斜桩的内河架空直立式码头结构特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- [11] 叶晨茂. 四跨五桩柱架空直立式码头结构整体安全评估[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
- [12] 王晓龙. 岸坡土体变形对框架码头排架结构受力性状的影响[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
- [13] 周 末,欧阳峰,安杰晶,等. 堆载过程中分离卸荷式板桩码头结构变形特性[J]. 水运工程, 2017(3): 90-94.
- [14] Wang J J, Zhou Y F, Wu X, et al. Effects of soaking and cyclic wet - dry actions on shear strength of an artificially mixed sand[J]. Journal of Civil Engineering, 2019, 23(4): 1617-1625.
- [15] Qiu Z, Wang J, Huang S, et al. Wetting - induced axial and volumetric strains of a sandstone mudstone particle mixture[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37: 1-9.
- [16] Wang J J, Qiu Z F. Anisotropic hydraulic conductivity and critical hydraulic gradient of a crushed sandstone - mudstone particle mixture[J]. Marine Geotechnology, 2016, 35(1): 89-97.
- [17] 王俊杰,方绪顺,邱珍锋. 砂泥岩颗粒混合料工程特性研究[M]. 北京:科学出版社, 2016.