

水平荷载作用下高桩码头叉桩扭角布置研究

夏天生¹, 陶桂兰¹, 王 定²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南长沙 410008)

摘要: 以湛江某高桩码头标准结构段桩基布置为例, 运用有限元软件ANSYS建立空间有限元模型, 考虑4种水平荷载作用控制工况, 对不同叉桩扭角布置方案码头桩基内力进行计算分析, 讨论水平地震荷载及船舶荷载对叉桩扭角布置的影响。计算结果表明: 结构横向水平位移与桩弯矩随扭角的增大而增大, 结构纵向水平位移和桩弯矩随扭角的增大而减小; 在纵向水平地震荷载组合工况下, 码头结构位移及桩弯矩最大; 综合考虑纵横向刚度的影响, 本码头结构段叉桩扭角选用20°较为合理。

关键词: 水平荷载; 高桩码头; 叉桩扭角; 桩基布置

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0079-05

Laying of fork pile fastened angle at high-pile wharf with horizontal load

XIA Tian-sheng¹, TAO Gui-lan¹, WANG Ding²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Transportation Planning Survey and Design Institute of Hunan Province, Changsha 410008, China)

Abstract: Selecting a structural segment of high-pile wharf in Zhanjiang as the research data, we build a space finite element model by finite element software ANSYS. Considering four kinds of horizontal loading effects as controlled working conditions, we calculate and analyze the internal force of pier pile under different fork pile fastened angles, and discuss the influence of horizontal earthquake effect and ship load on the laying of fork pile fastened angle. The results indicate that: when the fastened angle is growing bigger, the lateral displacement and bending moment of such structure increase, but the longitudinal displacement and bending moment become smaller. The displacement and the bending moment get the maximum under the working condition of the longitudinal horizontal earthquake effect. When the effect of longitudinal and lateral controlled working conditions is considered, fork pile fastened angle 20° will be reasonable in the structural segment of such high-pile wharf.

Key words: horizontal load; high-pile wharf; fork pile fastened angle; laying of pile foundation

高桩码头不仅要承受码头面较大的竖向荷载, 同时又要承受较大的水平荷载, 如水平地震荷载、船舶系缆力、船舶撞击力、船舶的挤靠力等。高桩码头结构承受水平荷载的能力与码头桩基扭角布置有很大的关系。工程实例表明, 码头结构的纵、横向刚度过小, 在较大的水平荷载作用下, 有可能产生较大的水平位移和内力, 使桩

基遭受破坏^[1-2], 从而影响码头结构的正常使用。水平荷载将是影响高桩码头桩基布置^[3-5]的重要因素。寻求在不同水平方向荷载作用下高桩码头桩基合理布置方案, 可以充分发挥桩基承载力, 不仅对工程造价、码头使用, 而且对结构抗震能力的提高都有着十分重要的现实意义。本文以湛江某高桩码头标准结构段桩基布置为例, 运用有限

收稿日期: 2012-10-29

作者简介: 夏天生(1987—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

元软件ANSYS, 重点讨论了水平荷载作用下码头结构的桩基受力特性, 在此基础上提出码头桩基扭角布置建议。

1 工程概况

本文研究对象采用湛江某高桩码头标准结构段, 结构段长67.8 m, 宽41.2 m, 面板厚0.6 m, 码头面高程7.0 m, 设计码头前沿底高程-17.4 m (当地

理论最低潮面), 以上回填块石, 坡度为1:1.8。港池底至高程-32.33 m为黏土层, 桩端持力层为中粗砾砂。PHC直桩外径1 200 mm, 壁厚150 mm, 底高程-38.0 m; 钢管叉桩 (倾斜度10:1, 3.5:1), 外径1 400 mm, 厚16 mm, 底高程-42.0 m。横梁截面尺寸2.4 m×1.2 m, 轨道梁3.1 m×1.2 m, 中纵梁2.1 m×0.8 m, 前边梁1.8 m×0.5 m, 后边梁2.1 m×0.5 m。码头横断面见图1, 结构段桩位见图2。

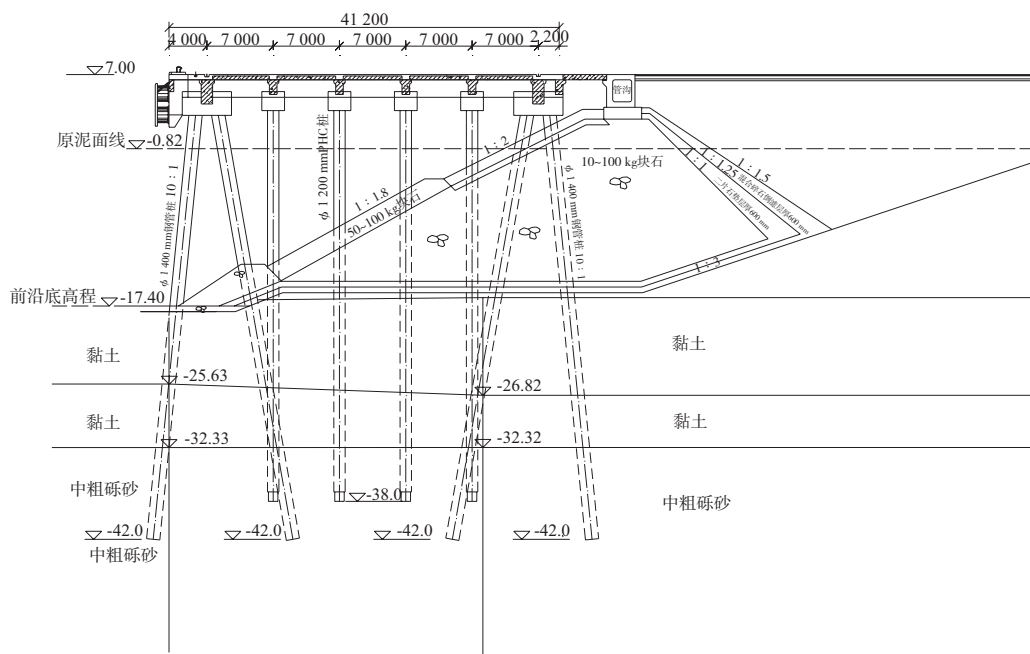


图1 码头横断面

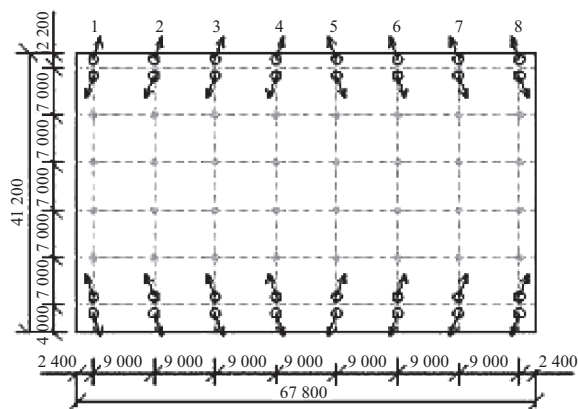


图2 码头结构段桩位

2 有限元模型及计算工况

结构分析采用静力分析和结构地震响应分析^[6-9]2种方法。结构地震响应分析采用振型分解反应谱法, 笔者在文献^[10]中已有阐述, 下面主要

介绍计算模型的建立。

2.1 计算模型

2.1.1 计算参数

本文选取高桩码头前方桩台一个结构段, 采用空间计算模型, 利用大型通用有限元软件ANSYS进行结构反应分析。码头钢筋混凝土结构和钢管桩采用线弹性本构模型, 各部分结构质量密度、弹性模量和泊松比见表1。

表1 材料物理参数

材料	质量密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
钢管叉桩	7 800	205.0	0.300
PHC直桩 (C80)	2 500	38.0	0.166
预制梁 (C50)	2 500	34.2	0.166
面板 (C45)	2 500	33.5	0.166

根据GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[11]可知,码头所在区域的地震设防烈度为7度,设计地震分组为第一组。根据本工程土层地质情况,场地类别为Ⅲ类场地,根据设计地震分组和场地类别可查得特征周期 $T_g=0.45$ s。结构常阻尼比取为 $\eta=0.05$,水平地震系数0.1,将特征周期代入新的JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》^[12]的 β 谱曲线进行水平地震响应分析。

模型的整体坐标为笛卡尔坐标,原点取在高桩码头结构段的后边梁左端下方高程为零处, X 轴平行于码头纵梁, Y 轴为垂直码头面,方向向上为正, Z 轴平行于码头横梁,指向临水侧。

2.1.2 边界条件

本模型选取高桩码头前方桩台的一个标准结构段作为研究对象,并对其边界条件进行一定的简化:1)有限元模型不考虑高桩结构段之间的相互作用,也不考虑高桩结构段与接岸结构的相互作用;2)钢管桩和PHC桩桩顶与纵横梁及面板固结,桩底端采用弹性嵌固点法考虑,弹性长桩的受弯嵌固点深度采用 m 法计算。各排桩嵌固点深度根据边坡的回填情况计算确定。

2.1.3 计算单元

码头纵横梁、钢管桩及PHC桩用梁单元beam188模拟。beam188单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构;面板用壳单元shell43模拟,shell43为4节点塑性大应变单元,具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变的特性,适合模拟线性、弯曲及适当厚度的壳体结构。纵横梁通过截面偏置模拟梁和面板的实际相对位置,在ANSYS软件中使用SECOFFSET命令定义截面偏移的信息。土对桩的垂直约束由桩轴向的弹簧单元combin14模拟,combin14是由2个节点组成的弹簧-阻尼器,具有一维、二维或三维应用中的轴向或扭转的性能。

2.2 计算工况

高桩码头结构段桩基叉桩扭角布置不仅影响码头结构的横向刚度,也影响到码头结构的纵向刚度,码头纵、横向刚度过小,结构会产生较大位移和内力而影响建筑物的正常使用,因此,桩

基叉桩扭角布置应综合考虑纵、横向水平荷载作用确定。本文通过永久荷载、可变荷载和偶然荷载的组合原则确定结构控制工况为4种,即主要考虑以下4种工况对结构桩基布置进行分析:

工况1:结构自重力+堆货荷载+船舶撞击力;

工况2:结构自重力+堆货荷载+系缆力+装卸桥荷载;

工况3:结构自重力+堆货荷载+系缆力+横向水平地震力;

工况4:结构自重力+堆货荷载+系缆力+纵向水平地震力。

码头堆货荷载取面载20 kPa,选鼓型SUC1450鼓-板低反力吸能,橡胶护舷布置在第1,3,5,7榀横向排架上,计算得船舶撞击力为955 kN,按其码头最不利影响位置考虑,作用在第1,3横向排架的橡胶护舷上。系缆力水平横向分力为710 kN,竖向分力为380 kN,横梁截面高度2.4 m,中和轴在横梁截面的中心处,系船柱高度0.5 m,故系缆力到中和轴距离1.7 m,所以系缆力对横梁中和轴所产生的弯矩为 710×1.7 kN·m,作用在结构段第1,3,5排架系船柱上。装卸桥规格为46 m-41 t,工况选取吊具在外伸距处以额定起重量工作,风向为+Y向,海侧轮压500 kN/轮,陆侧轮压380 kN/轮,按JTJ 215—1998《港口工程荷载规范局部修订》^[13]工作状态(风速20 m/s)下,该型号装卸桥垂直轨道方向水平力标准值为14 kN/轮,取海侧方向。荷载分项系数根据《港口工程荷载规范》^[14]取值,地震时各作用的组合系数 ψ 根据《水运工程抗震设计规范》中规定确定。挤靠力方向垂直于码头前沿向岸,由于后方接岸结构的顶撑,挤靠力对码头结构影响忽略不计。

3 计算结果分析

以叉桩对称布置形式(图2)来讨论扭角对码头结构段纵横向刚度的影响。当叉桩与横向之间的扭角为15°,20°,25°时,计算上述4种工况下的结构最大响应见表2。

从表2可以看出:工况2和工况3均产生较大的

表2 扭角15°，20°，25° 时结构响应最大值

扭角	工况	整体 位移 U_{sum}/mm	位移分量最大值/mm			最大桩力 F_{max}/kN	最小桩力 F_{min}/kN	桩扭矩 $M_y/(kN \cdot m)$	桩弯矩/($kN \cdot m$)	
			X	Y	Z				M_x	M_z
15°	1	14.39	-5.70	-11.07	-11.57	4 279.0	1 144.0	27.67	509.52	188.7
	2	23.50	6.77	-16.90	18.20	4 962.0	1 032.0	28.20	577.70	203.7
	3	18.80	1.70	-8.30	15.40	2 820.2	627.2	10.80	513.60	85.7
	4	27.90	19.50	-8.30	8.70	2 752.0	836.9	17.40	228.10	615.2
20°	1	14.17	-5.40	-11.07	-11.40	4 280.0	1 157.0	26.90	503.60	183.4
	2	23.60	6.70	-16.95	18.27	4 979.0	1 045.0	27.90	580.90	216.6
	3	19.10	1.60	-8.20	15.60	2 822.1	630.4	11.00	521.40	84.2
	4	26.80	18.30	-8.20	8.70	2 754.9	776.8	17.40	234.60	574.6
25°	1	14.18	-5.10	-11.07	-11.5	4 281.0	1 166.0	26.40	501.80	179.8
	2	23.90	6.60	-16.98	18.60	4 995.0	1 055.0	27.70	590.40	231.7
	3	19.40	1.60	-8.30	16.10	2 823.6	633.0	11.10	534.00	93.8
	4	25.80	17.20	-8.30	8.90	2 757.3	729.6	17.40	243.20	533.6

横向水平位移，工况4作用下结构产生的纵向水平位移最大，工况2和工况4的桩弯矩也较大。若以结构位移和桩弯矩作为控制指标，该结构段叉桩布置横向荷载控制工况为工况2，纵向荷载控制工况为工况4。图3，4为各工况水平位移和桩最大弯矩随叉桩扭角变化关系。

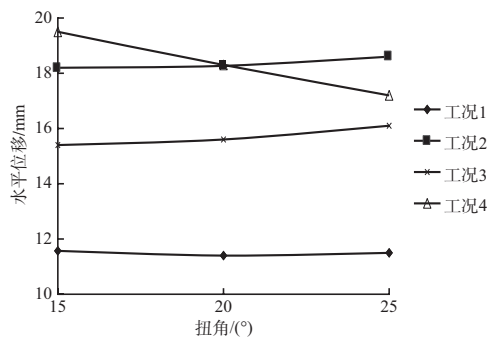


图3 结构段水平位移与扭角关系

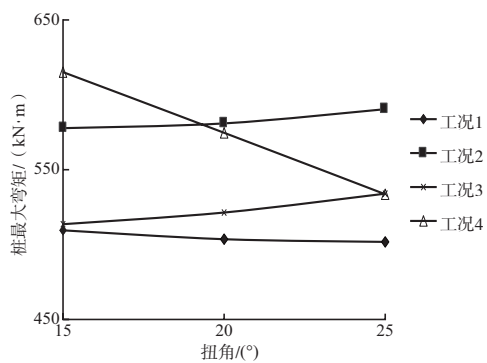


图4 结构段桩最大弯矩与扭角关系

从图3及图4可以看出，随着扭角的增大，结构横向刚度不断减小，工况2、工况3的最大位移与桩弯矩随扭角增大而增大；随扭角的增大，结

构的纵向刚度得到提高，工况4在纵向水平地震力作用下，结构的最大位移和桩弯矩随扭角增大不断减小。由工况2与工况4两线交点可知，叉桩扭角在20°时两种控制工况下结构整体位移相当，在扭角19°时两种控制工况下桩最大弯矩相当。在持久状况船舶撞击力作用下，结构最大位移和桩弯矩随扭角变化较小；在偶然状况横向水平地震力和系缆力作用下，结构的整体位移和弯矩随着叉桩扭角增大而增大，表明结构横向刚度随扭角增大呈减小趋势。

从表2中可以看出，工况3的桩力最小，当桩基在承受较大横向水平荷载时，有可能产生拉桩，对于桩而言，工况3下结构更危险。表3为叉桩扭角20°时工况3桩轴力。

表3 扭角20° 时工况3桩力

桩号	排架							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	630	897	1 032	1 094	1 157	1 172	1 106	884
B	2 514	2 720	2 781	2 772	2 685	2 629	2 495	2 211
C	1 855	2 224	2 346	2 369	2 379	2 374	2 266	1 907
D	2 185	2 582	2 698	2 706	2 708	2 703	2 589	2 195
E	2 184	2 577	2 693	2 697	2 695	2 685	2 570	2 181
F	1 992	2 359	2 474	2 484	2 474	2 457	2 341	1 986
G	729	1 051	1 190	1 254	1 356	1 386	1 332	1 125
H	2 486	2 742	2 820	2 822	2 761	2 726	2 610	2 341

注：排架编号1~8见图2，桩编号A~H按靠岸至靠海的顺序依次排列。

从表3可以看出，在横向水平地震力和系缆力同时施加于结构上时，最小桩力出现在各排架

后排叉桩向岸斜桩上,系缆力作用位置处桩力较小,受系缆力和水平地震力的共同作用,结构段端部后排叉桩向岸斜桩桩力最小。

4 结语

1) 系缆力+装卸桥轨道水平荷载组合工况及系缆力+横向水平地震力荷载组合工况下均产生较大的横向水平位移和桩顶弯矩,为叉桩扭角布置的横向荷载控制工况,系缆力+纵向水平地震力荷载组合工况下,结构产生的纵向水平位移和桩弯矩最大,为叉桩扭角布置纵向荷载控制工况。

2) 叉桩扭角的布置对抵抗不同方向的水平力起到了重要的作用。结构横向水平位移与桩弯矩随扭角的增大而增大,结构纵向水平位移和桩弯矩随扭角的增大而减小。叉桩更多的是抵抗横向水平荷载,扭角不宜太大,综合考虑纵横向刚度的影响,本码头结构段叉桩扭角选用 20° 较为合理。当中间两列斜桩扭角为 20° 时,倾斜坡度为3.5:1,叉桩与其相邻直桩之间的跨距为7 m,算得叉桩与其相邻直桩间的净距为2.5 m,满足净距要求。

3) 最小桩力出现在偶然状况横向水平地震荷载、堆载和系缆力作用组合,最小桩力位置位于系缆力作用的排架后排叉桩向岸斜桩上,当桩基承受较大横向水平荷载时,有可能产生拉桩,在抗震设防时,需加强该部分斜桩的强度。

参考文献:

- [1] 天津新港码头7.28震害调查组. 天津新港码头7.28地震震害调查报告[J]. 港工技术, 1977(3): 1-30.
- [2] 邓重健. 高桩码头的抗震设计[J]. 港口工程, 1987(3): 26-31.
- [3] 赵冲久, 熊洪峰, 刘现鹏. 船舶撞击力在高桩码头排架中的分配研究[J]. 水道港口, 2010(2): 132-137.
- [4] 徐伟国. 高桩码头桩基布置力学判断浅析[J]. 水运工程, 1988(11): 32-35.
- [5] 杨有军. 高桩码头柔性高桩承台和桩基在水平力作用下的计算研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [6] 徐龙军, 谢礼力. 抗震设计谱的发展及相关问题综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 46-57.
- [7] 赵光恒. 结构动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [8] Bing H L, Charles W R. Dynamic Performance of Pile Wharf Structural System[R]. Washington: University of Washington, 2004.
- [9] Charles W R. Seismic Performance of Pile-Wharf Connection[R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2001.
- [10] 陶桂兰, 王定. 水平地震作用下高桩码头结构响应谱分析[J]. 中国港湾建设, 2012(1): 9-11.
- [11] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
- [12] JTS 146—2012 水运工程抗震设计规范[S].
- [13] JTJ 215—1998 港口工程荷载规范局部修订[S].
- [14] JTJ 215—1998 港口工程荷载规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。