

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.019

高桩码头叉桩布置形式抗震性能分析

陶桂兰¹, 陈 祥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:以湛江某高桩码头单个结构段为研究对象, 建立空间有限元模型, 采用反应谱法对水平地震作用横向、纵向输入进行地震动力响应分析, 对比分析了 4 种叉桩布置形式在不同水平方向地震作用下码头桩基内力受力特性。计算结果表明, 桩基横轴对称布置结构在横向水平地震作用时, 整体最大位移和桩内力均较小, 桩基双轴对称布置形式在不同水平方向地震作用下结构响应比其他形式相对较小。在高桩码头的抗震设计中, 叉桩不会碰桩的情况下, 采用桩基双轴对称布置形式较为合理。

关键词:高桩码头; 叉桩布置形式; 振型分解反应谱法; 抗震性能

中图分类号: U442.5+5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2012)04-0469-06

Seismic performance analysis of fork pile arrangement type of high-pile wharf

TAO Guilan¹, CHEN Xiang¹, WANG Ding²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410008, China)

Abstract: A spatial finite element model was built, and the response spectrum method was used to analyze the dynamic seismic response under the horizontal earthquake effect along the transverse and longitudinal directions, in a structural segment of a high-pile wharf. The internal stress characteristics of the pile foundations of four fork pile arrangements under different horizontal earthquake effects were compared and analyzed. The calculation results show that when the pile foundation in a transverse symmetry arrangement was responding to transverse earthquake effect, the whole maximal displacement and internal force of piles were small, and the structural response of the pile foundation in symmetrical arrangement under different horizontal earthquake effects was smaller than that in other arrangements. When the fork piles do not collide, it is more reasonable to use the symmetrical arrangement type for pile foundations in the seismic design of high-pile wharfs.

Key words: high-pile wharf; fork pile arrangement type; vibration mode decomposition response spectrum method; seismic performance

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。因此常在前后轨道梁下设置叉桩以抵抗较大的水平和垂直荷载。叉桩的布置主要决定于水平荷载的大小、方向及施工技术, 而水平荷载的不确定性, 如水平地震方向是随机的, 使叉桩的布置更为复杂。从国内外发生的地震实例中可以发现, 高桩码头桩基础容易遭受地震破坏^[1-5]。对于需进行抗震设防的地震烈度为 7 度及以下的地区, 防范水平地震力将是高桩码头桩基布置的重要因素。寻求在水平地震力作用下高桩码头桩基布置方案, 对工程设计有重要的指导意义。笔者以湛江某高桩码头标准结构段桩基布置为例, 对几种不同叉桩布置形式的码头结构进行地震反应谱分析, 重点探讨在水平地震作用下码头结构桩基受力状态, 在此基础上提出在抗震条件下码头桩基布置形式的建议。

1 叉桩的布置形式

高桩码头叉桩布置时,为避免与前后直桩碰桩,叉桩通常会偏转1个角度,此外,高桩码头所承受的水平荷载并不一定是沿横向的(如系缆力和水平地震荷载等),工程上往往要求叉桩还能在一定程度上抵抗其他方向的水平力^[6-8],即需设置一定的扭角。桩基中不同位置叉桩的不同扭角方向便形成不同的叉桩布置形式。

1.1 非对称布置

叉桩非对称布置的码头结构段的叉桩扭角方向一致,叉桩水平投影相互平行,桩基布置沿纵、横两个方向都不对称,如图1(a)。该布置形式的主要优点是施工方便,扭角方向一致,打桩设备不需调整角度便可施打,不易发生碰桩,所有叉桩的水平投影都是平行的,只要前后叉桩水平投影不在同一条直线上就不会发生碰桩。不足之处是当承受垂直于叉桩扭角方向的水平地震荷载时,叉桩不能起到抵抗水平力的作用,不适合建于有较高抗震设防烈度要求的地区。

1.2 单轴对称布置

单轴对称又可分为横轴对称和纵轴对称。横轴对称布置是指码头结构段的叉桩扭角方向关于横向中心线是对称的,纵轴对称布置是指码头结构段的叉桩扭角方向关于纵向中心线是对称的,如图1(b)(c)所示。横轴对称桩基的主要优点是承受横向水平荷载时,高桩码头结构段不会发生扭转,受力均匀,除中间两排架叉桩需调整扭角和倾角外,其他叉桩一般都不会碰桩。缺点是在纵向水平荷载作用下结构段会产生扭转,需调整中间两排架下的叉桩扭角和倾角,避免碰桩。纵轴对称桩基的主要优点是承受纵向水平荷载时,高桩码头结构段不会发生扭转,受力均匀,施工较横轴对称桩基布置方便,其缺点是在桩较长时容易碰桩,在横向水平荷载作用下结构段会产生扭转。

1.3 双轴对称布置

双轴对称布置形式如图1(d)所示,码头结构段的叉桩扭角关于纵、横向中心线均对称布置。桩基左端后叉桩和右端前叉桩的扭角为横向顺时针偏转,桩基右端后叉桩和左端前叉桩的扭角为横向逆时针偏转。这种布置形式的主要优点是承受纵、横向水平荷载时,高桩码头结构段受力均匀,适合有较高抗震设防要求的地区。缺点是容易碰桩,为避免碰桩需调小叉桩的倾角,从而减小了叉桩抵抗水平力的能力,或调整前后叉桩的扭角,而使得叉桩沿纵、横向并非完全对称。

2 4种叉桩布置形式的结构抗震性能比较

叉桩是高桩码头主要的侧向受力构件,不同的叉桩布置形式其抗震性能是不同的,为进一步了解叉桩布置形式对其抗震性能的影响,对以上4种叉桩布置形式进行了动力有限元分析,分别模拟其在纵、横2个方向水平地震作用下结构的动力响应。

2.1 地震反应分析方法

采用振型分解反应谱法^[9-13]进行结构地震响应分析。振型分解反应谱法是在振型分解法和反应谱法基础上发展起来的1种计算多自由度体系地震作用的方法。该方法利用振型分解法,将多自由度体系分解成若干个单自由度体系的组合,然后应用单自由度体系的反应谱理论来计算各振型的地震作用,再将各个独立解进行组合叠加,得出总的反应,是抗震规范中推荐的方法^[4]。

用反应谱法求解多自由度系统在地震荷载下的响应时,一般可先求出各振型的地震荷载,然后按静力法求得结构的其他动力响应,经组合后求得结构总响应。水平地震作用可用各质点所受惯性力来代表,质点j上的水平地震作用为

$$F_{ji\max} = m_j \eta_i \delta_{ji} |A_{ai}|_{\max} = m_j \eta_i \delta_{ji} g \cdot \frac{|A_{ai}|_{\max}}{\ddot{y}_{g\max}} \cdot \frac{\ddot{y}_{g\max}}{g} = w_j \eta_i \delta_{ji} \beta_i K (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $F_{ji\max}$ ——i振型j质点上的最大水平地震作用; m_j ——j质点的质量; η_i ——i振型的参与系数; δ_{ji} ——i振型j质点的振型位移; $|A_{ai}|_{\max}$ ——系统在i振型中的最大绝对加速度; $\ddot{y}_{g\max}$ ——地基水平运动最大加速度; β_i ——i阶振型的动力放大系数; K ——地震系数; w_j ——集中于j质点的重力荷载标准值。



图 1 4 种叉桩布置形式(单位:mm)

Fig. 1 Four types of fork pile arrangements(units mm)

由式(1)结合抗震设计规范给出的设计反应谱(β谱),可求得对应于某一振型各质点的最大水平地震作用,再按一般的结构力学原理,把地震作用视为静力荷载,可求得对应于各振型的地震作用效应 S_j (弯矩、剪力、轴力、位移等)。考虑到结构振动时,相应于各振型的最大地震作用效应一般不会同时发生,我国现行的抗震设计规范规定^[4],结构的地震作用效应(弯矩、剪力、轴力和变形)按“平方和开方”公式(SRSS法)计算,即

$$S_{EK} = \sqrt{\sum S_j^2}$$

(2)

式中: S_{EK} ——水平地震作用标准值效应; S_j —— j 振型水平地震作用标准值的效应,可只取前2~3阶振型。

2.2 计算模型

2.2.1 工程概况

计算模型采用湛江某高桩码头的标准结构段,结构段长67.8m,宽41.2m,面板厚0.6m,码头面高程7.0m,设计码头前沿底高程-17.4m(当地理论最低潮面),PHC直桩外径1200mm,壁厚150mm,底高程-38.0m,钢管叉桩(倾斜度10:1,3.5:1),外径1400mm,厚16mm,底高程-42.0m。横梁截面尺寸2.4m×1.2m,轨道梁3.1m×1.2m,中纵梁2.1m×0.8m,前边梁1.8m×0.5m,后边梁2.1m×0.5m。

2.2.2 有限元模型的建立

a. 计算参数。选取高桩码头前方桩台1个结构段,采用空间计算模型,利用大型通用有限元软件ANSYS模拟水平地震作用下的结构响应^[14]。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。

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, Z 轴平行于码头横梁,指向临水侧。

表 1 材料物理参数

Table 1 Material physical parameters

结构材料	质量密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/kPa	泊松比 μ
钢管叉桩	7800	2.05×10^8	0.300
PHC直桩(C80)	2500	3.80×10^7	0.166
预制梁(C50)	2500	3.45×10^7	0.166
面板(C45)	2500	3.35×10^7	0.166

b. 计算单元及边界条件。码头纵横梁、钢管桩及 PHC 桩采用梁单元 beam188 模拟,面板用壳单元 shell43 模拟,纵横梁通过截面偏置模拟梁和面板的实际相对位置,钢管桩和 PHC 桩桩顶与纵横梁及面板固结,桩端采用弹性嵌固点法考虑,土对桩的垂直约束由桩轴向的弹簧单元 combin43 模拟,弹性长桩的受弯嵌固点深度用 m 法计算。

2.2.3 地震反应谱的选取

码头所在区域的地震设防烈度为 7 度,根据本工程土层地质情况,场地类别为Ⅲ类场地。结构常阻尼比取为 $\eta = 0.05$,水平地震系数 0.1,采用文献 4 推荐的 β 谱曲线进行水平地震响应分析。

2.3 计算结果分析

2.3.1 结构模态分析

通常情况下,地震引起的系统内力前几阶振型的影响比较大。因此,在结构抗震计算中,只需取前面几个振型就可以满足实际工程的需要。笔者采用分块兰索斯(block lanczos)法对不同桩基布置的码头结构进行模态分析^[14],桩基布置如图 1 所示,其扭角大小均为 20°。其前 4 阶模态的固有频率及各方向振型参与系数见表 2。

表 2 前 4 阶振型频率及各方向振型参与系数

Table 2 Previous four modal frequencies and participation factors

桩基形式	模态	频率	周期	振型参与系数					
				γ_{jx}	γ_{jy}	γ_{jz}	γ_{rotjx}	γ_{rotjy}	γ_{rotjz}
非对称	1	0.558	1.792	94.779	0.046	34.856	157.140	953.180	-425.910
	2	1.040	0.962	-0.995	-1.024	24.315	146.830	-3167.800	-39.973
	3	1.135	0.881	-35.652	-0.180	91.776	483.210	-3299.300	156.460
	4	6.171	0.162	0.631	-2.287	-0.852	97.305	44.729	-70.042
纵轴对称	1	0.652	1.533	100.770	-1.275	0.001	29.497	2314.300	-498.370
	2	0.969	1.032	-7.600	0.224	65.802	263.990	-573.270	40.921
	3	1.189	0.841	6.507	0.173	76.973	283.350	-4024.400	-22.536
	4	6.170	0.162	0.381	-2.198	-0.304	83.540	18.153	-69.359
横轴对称	1	0.561	1.782	94.474	0.000	0.000	0.000	2810.200	-431.030
	2	1.078	0.928	0.000	-0.396	101.140	527.870	-3428.600	-13.421
	3	1.116	0.896	36.470	0.000	0.000	0.000	-1480.800	-158.690
	4	6.172	0.162	0.000	2.396	0.914	-102.260	-30.972	81.233
双轴对称	1	0.657	1.521	100.900	0.000	0.000	0.000	2285.800	-432.620
	2	1.077	0.928	0.000	-0.392	101.140	527.730	-3428.600	-13.305
	3	1.207	0.829	8.729	0.000	0.000	0.000	-2204.100	-48.458
	4	6.172	0.162	0.000	-2.401	-0.931	103.150	31.562	-81.386

注: γ_{jx} 、 γ_{jy} 、 γ_{jz} 分别为第 j 阶振型沿 x 、 y 、 z 轴方向的平动参与系数; γ_{rotjx} 、 γ_{rotjy} 、 γ_{rotjz} 分别为第 j 阶振型绕 x 、 y 、 z 轴方向的转动参与系数。

2.3.2 结构内力及位移分析

对上述 4 种叉桩布置形式的码头结构,在纵、横 2 个方向进行水平地震激励,得到结构段位移和桩内力的最大值(表 3~表 4)。

表 3 结构内力响应最大值

Table 3 Maximum response of structural internal force

激励方向	布置形式	桩轴力 F/kN	桩扭矩 $M_y/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	桩弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)			桩剪力/ kN		
				M_x	M_z	合成弯矩	S_{Fx}	S_{Fz}	合成剪力
纵向	非对称	324.6	7.6	293.6	545	619.1	25.4	40.0	54.3
	横轴对称	477.4	32.3	309.6	448.8	545.2	26.6	36.7	45.3
	纵轴对称	566.3	8.4	98.8	513.6	523.0	8.4	45.5	46.3
	双轴对称	498.5	7.1	82.2	517	523.5	6.9	45.8	46.3
横向	非对称	763.1	13.4	337.4	256.4	423.7	28.9	22.7	36.7
	横轴对称	599.3	0.6	304.5	1.9	304.5	26.2	0.2	26.2
	纵轴对称	826.3	29.9	393.9	207.3	445.1	35.1	17.6	39.3
	双轴对称	600.4	0.6	304.7	1.9	304.7	26.2	0.2	26.2

表 4 结构位移响应最大值

Table 4 Maximum response of structural displacement

激励方向	布置形式	总位移 U_{sum}/mm	纵向位移 U_{xmax}/mm	横向位移 U_{ymax}/mm
纵 向	非 对 称	19.694	17.619	8.791
	横轴对称	23.952	21.829	9.912
	纵轴对称	17.228	17.027	2.613
	双轴对称	16.904	16.751	2.185
横 向	非 对 称	12.741	7.31	10.397
	横轴对称	9.151	0.069	9.106
	纵轴对称	13.107	6.232	11.524
	双轴对称	9.154	0.069	9.112

从表 3 ~ 表 4 可以看出 ,纵向地震作用下 ,桩基为横轴对称布置时 ,结构总位移最大 ,相应的纵向位移也最大 ,桩基为非对称布置时 ,桩弯矩及桩剪力均较大。横向地震作用下 ,桩基为纵轴对称布置时 ,结构总位移最大 ,其桩轴力、扭矩、弯矩、及剪力也均最大 ,在不同方向的水平地震作用下 ,双轴对称布置形式结构段的扭矩、合成弯矩及合成剪力均较小。由此可见 ,在叉桩不碰桩的情况下 ,双轴对称桩基布置形式是最优的 ,尤其是在较高地震设防要求的地区 ,地震荷载方向的随机性要求高桩码头在各个方向都能抵抗水平地震作用 ,而双轴对称桩基布置形式的结构响应比其他形式相对较小。

相对于非对称布置形式 ,在横向水平地震作用时 ,横轴对称桩基布置形式结构位移和桩内力均较小。可见 ,在横向水平荷载为主的情况下 ,横轴对称桩基布置形式相比非对称布置形式更合理。

3 结 论

以湛江某高桩码头结构段建立有限元模型 ,采用反应谱法对水平地震作用横向、纵向输入进行了地震动力响应分析 ,对高桩码头叉桩不同布置形式结构内力特性进行分析 ,得出以下几点结论 :

- a. 在不同方向的水平地震作用下 ,叉桩非对称布置形式结构段的桩内力均较大 ,因此 ,在高桩码头抗震设计中应尽量避免采用该种形式。
- b. 桩基横轴对称布置时 ,结构的纵向刚度较小 ,在纵向地震作用下 ,结构整体位移最大 ,但这种布置形式在横向水平地震作用时 ,整体最大位移和桩内力均较小 ,因此当结构主要承受横向水平荷载时 ,可优先考虑采用桩基横轴对称布置。
- c. 在有较高地震设防要求的地区 ,由于地震荷载方向的随机性 ,要求高桩码头在各个方向都能抵抗水平地震作用 ,而双轴对称布置形式的结构响应比其他形式相对较小 ,在叉桩不会碰桩的情况下 ,采用桩基双轴对称布置形式较为合理。

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.(Tianjin xingang port 7.28 earthquake investigation team. Tianjin xingang port 7.28 earthquake damage survey repor[J]. Port Engineering Technology ,1977 (3) :1-30.(in Chinese))

[2] 许锡宾.从天津港码头设施的震害谈高桩码头结构设计[J].水运工程 ,1993(4) :18-22. (XU Xibin. From the earthquake damage of Tianjin Port terminal facilities about structural design of high-pile wharf[J]. Port & Waterway Engineering ,1993(4) :18-22. (in Chinese))

[3] 谢世楞.奥克兰港高桩码头的震害对比[J].港工技术 ,1990(4) :13-17.(XIE Shileng. Contrast of Auckland high-pile wharf ' s earthquake damag[J]. Port Engineering Technology ,1990(4) :13-17.(in Chinese))

[4] JTJ 225—98 水运工程抗震设计规范[S].北京 :人民交通出版社 ,1998.

[5] 龙炳煌 ,雷立志.高桩码头叉桩震害分析及设计建议[J].中国港湾建设 ,2007(1) :7-10.(LONG Binghuang , LEI Lizhi. Seismic Analysis of and Design Suggestions for Batter-Piles in Pile-Wharf[J]. China Harbour Engineering ,2007(1) :7-10.(in Chinese))

[6] 张娟 ,贡金鑫.中美三板桩码头抗震设计方法比较研究[J].水运工程 ,2010(9) :136-154. (ZHANG Juan , GONG Jinxin. Comparative analysis on seismic design approach of sheet pile wharf in China , the U.S. and Japa[J]. Port & Waterway Engineering , 2010(9) :136-154.(in Chinese))

- [7] 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.(XU Weiguo. The mechanical judge analysis of pile layout of high-pile wharf[J]. Port & Waterway Engineering,1988(11):32-35.(in Chinese))
- [8] 邓重健.高桩码头的抗震设计[J].港口工程,1987(3):26-31.(DENG Chongjian. The seismic design of the pile wharf[J]. Harbor Engineering,1987(3):26-31.(in Chinese))
- [9] 李培振,吕西林.考虑土-结构相互作用的高层建筑抗震分析[J].地震工程与工程振动,2004,24(3):130-138.(LI Peizhen, LU Xilin. Considering the interaction between soil-structure of the high-rise building seismic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2004,24(3):130-138.(in Chinese))
- [10] ROEDEREOT C W. Seismic performance of pile-wharf connection[D]. Berkeley :University of California ,Berkeley , Pacific Earthquake Engineering Research Center 2001.
- [11] MCCULLOUGH N J ,DICKENSON S E ,SCHLECHTER S M. The seismic performance of piles in waterfront applications[C]//ASCE Conf Proc America 's Ports :Gateways to the Global Economy Proceedings of Ports Conference 2001. USA ASCE 2001 :1-10.
- [12] 徐龙军,谢礼力,胡进军.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.(XU Longjun, XIE Lili, HU Jinjun. The review of development and certain problems in seismic design spectra[J]. World Information on Earthquake Engineering 2007,23(2):46-57.(in Chinese))
- [13] LONG Binghuang, ROEDER C W. Dynamic Performance of Pile Wharf Structural System[R]. Washington D. C. :University of Washington 2004.
- [14] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京 :人民交通出版社,2007.

2012 年全国博士研究生学术论坛将在河海大学举办

由国务院学位委员会办公室和教育部学位管理与研究生教育司主办,河海大学承办的 2012 年全国博士研究生学术论坛(港口、航道、海岸与海洋工程全国研究生学术交流平台)将于 2012 年 8 月 10—12 日在河海大学举办。本次论坛学术交流将涵盖海岸动力学与海洋工程水文、港口与航道工程、海岸与近海工程、海岸带资源与环境等相关领域。

全国博士研究生学术论坛是专为全国博士研究生提供的一个高起点、大范围、多领域的学术交流平台,其以博士研究生自主开展学术交流和研究活动为主,同时聘请高水平专家学者作点评,并进行前沿科学(技术)及研究生创新能力培养方面的专题学术报告。

(本刊编辑部供稿)