

基于 ABAQUS 的拱式纵梁码头 撞击作用下的动力响应分析

阎佳安¹, 翟秋¹, 侯捷¹, 成晔²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 天津水运工程勘察设计院, 天津 300456)

摘要: 基于 ABAQUS 有限元软件, 建立了拱式纵梁码头结构的三维实体模型; 以码头的的一个结构段为例, 对异常靠泊时, 结构在船舶撞击力作用下的动力响应特性进行了分析研究; 验证了撞击力动力时程曲线建模方法的可行性。研究表明: 由于拱式纵梁码头结构的特殊性, 宜在建设前期, 对拱圈梁和上弦杆夹角处进行加固; 材料承载能力满足码头自重要求时, 异常靠泊时船舶撞击力对该码头桩基结构的影响较小。结果可为拱式纵梁码头结构在实际工程中的应用提供参考。

关键词: 拱式纵梁码头; 异常靠泊; 撞击力; 有限元; 动力响应

中图分类号: U656.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2017)10-0032-05

doi: 10.7640/zggwjs201710007

Analysis on dynamic response of wharf with arched longitudinal beams under ship impact force based on ABAQUS

YAN Jia-an¹, ZHAI Qiu¹, HOU Jie¹, CHENG Ye²

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

2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Three-dimensional solid model of wharf with arched longitudinal beams was built by finite element software ABAQUS. Taking one structural segment as an example, the dynamic response characteristics of the structure under the impact force caused by abnormal berthing were analyzed and studied. The feasibility of the modeling approach used to input the impact force data was verified. The results show that due to the particularity of the wharf with arched longitudinal beams, the angle part between arch beam and top chord needs to be reinforced in the early stage of the construction. When the material carrying capacities meet the requirements of the wharf's dead-weight, the impact of the ship's impact force caused by abnormal berthing on the wharf pile-supported structures is small. The results may provide a reference for the application of wharf with arched longitudinal beams in engineering.

Key words: wharf with arched longitudinal beams; abnormal berthing; impact force; finite element; dynamic response

0 引言

近年来, 由于对外贸易量的增大, 船舶尺度也日渐大型化。2016 年, 国家发改委颁发《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》, 根据纲要^[1], 未来 5 a 我国将大力持续

发展基建, 对港口码头泊位进行改建或重建以适应吞吐量的需求。而目前我国沿海天然优良深水港址稀缺, 导致深水码头建设逐渐向气候环境恶劣的外海延伸, 这就要求码头结构需要同时满足承载力、吞吐量以及适应外海环境的要求。

翟秋等^[2-3]提出拱式纵梁码头结构形式, 该码头结构借鉴拱桥中的拱式结构, 使得结构在满足承载能力的基础上, 同时能够有效减少建设工程的水下工程量, 降低工程造价, 与现有的普通高

收稿日期: 2017-03-17 修回日期: 2017-05-30

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20160865)

作者简介: 阎佳安 (1994—), 女, 江苏滨海人, 硕士研究生, 主要从事港口航道及海岸工程结构研究。E-mail: jiaanhenini@163.com

桩码头结构形式相比,更加具有经济性。

对于任何码头结构来说,船舶撞击力都是其承受的主要荷载之一。而船舶大型化、靠泊作业频繁、管理漏洞以及某些不可抗力因素造成异常靠泊事故时有发生^[4]。对于拱式纵梁码头结构受异常靠泊引起的船舶撞击力的研究相对较少,给该结构的推广带来一定的局限性。

1 拱式纵梁码头结构形式

拱式纵梁码头结构借鉴了拱桥中的拱式结构,拱式结构具有跨度能力大、造价经济的优势,而且可以充分利用混凝土优越的抗压性能,与同跨度同荷载的普通纵梁相比,具有截面上弯矩小的优点^[5],在材料强度利用上也更为合理、经济。本文取一个结构段进行分析,具体构件尺寸见图1。

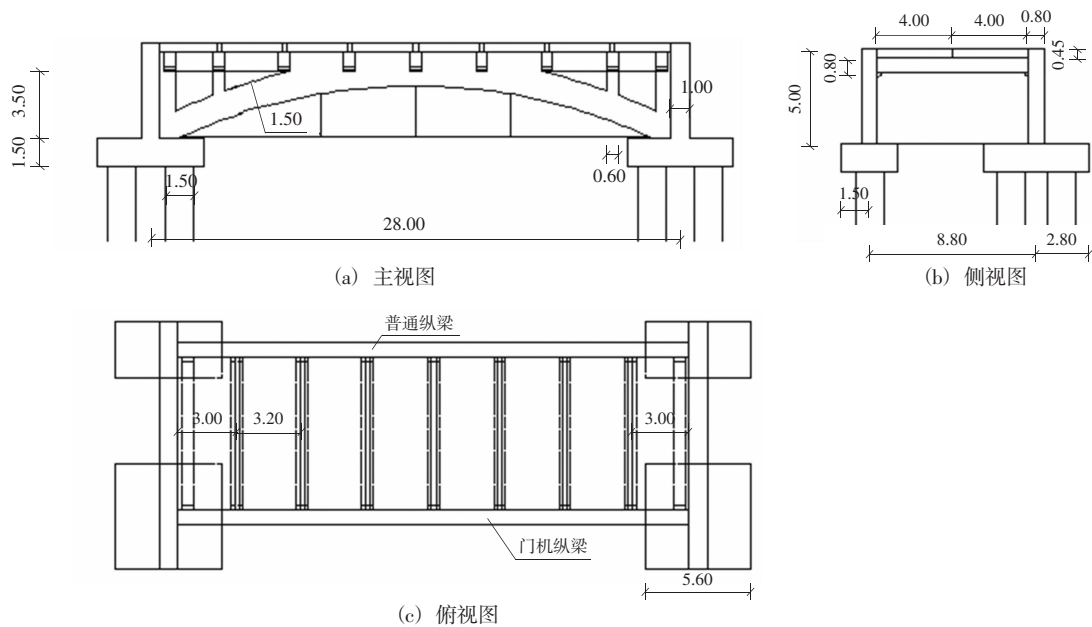


图1 拱式纵梁码头结构单跨尺寸示意图(m)

Fig. 1 Schemes of a single span in wharf with arched longitudinal beams (m)

设计码头结构段长度为56 m,宽度为38.4 m。拱式纵梁总高度5 m,从码头前沿至后方共设置5根拱式纵梁,其中每两纵梁之间的横向间距为8.8 m。一个结构段内设置2个排架,排架间距28 m(即拱的跨径28 m),拱的矢高3.5 m,矢跨比1/8。横梁截面尺寸为5.0 m×1.0 m,上弦杆1.5 m×0.8 m,拱圈梁1.5 m×0.8 m,横向水平撑0.6 m×0.8 m,腹杆0.6 m×0.8 m。两拱式纵梁的横向间距为8.8 m,纵梁之间设置的横向水平

撑到横梁的距离分别为0.5 m、3.1 m、6.56 m、10 m、13.5 m,中面板尺寸为3.2 m×4 m,边面板尺寸为3 m×4 m,面板厚度均为0.4 m、磨耗层厚度取0.05 m。

基桩采用直径为1 500 mm的钢管桩,打入深度按照地质条件选取,轨道梁下的桩基墩台边长5.6 m,高1.5 m,墩台下布置3根钢管桩;普通纵梁的桩基墩台长5.6 m,宽3 m,高1.5 m,墩台下布置2根钢管桩。布置方式见图2。

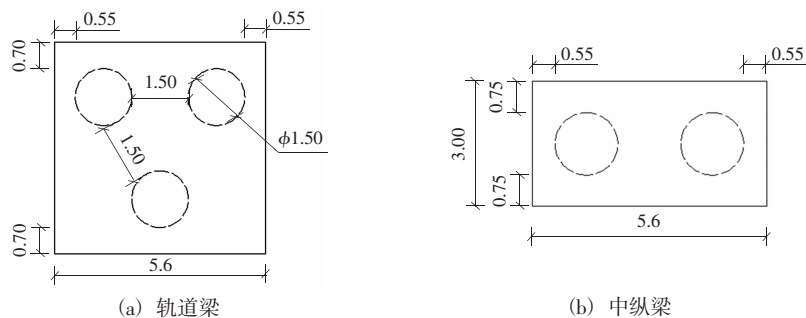


图2 桩基布置示意图(m)

Fig. 2 Layout diagram of pile foundation (m)

2 三维实体有限元计算模型

2.1 工程概况

文中进行的拱式纵梁码头结构分析依托上海

港某码头工程,设计船型为15万吨级集装箱船,船舶控制系泊风力为9级,风速22.6 m/s,设计流速1.80 m/s。土体力学性质指标见表1。

表1 工程地质材料力学参数汇总表

Table 1 Mechanical property of engineering geological materials

标号	土层名称	土层厚度/m	泊松比 ν	压缩模量/MPa	弹性模量/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi_k/(\circ)$	c_k/kPa
II 2	灰黄-灰色粉砂夹粉质黏土	2.7	0.25	7.50	22.50	1 939	30.0	8.0
II 1	灰黄色粉质黏土夹粉砂	3.1	0.32	5.60	16.80	1 949	30.5	8.0
III 2	灰黄-灰色淤泥质粉质黏土	5.0	0.35	3.10	9.30	1 827	23.5	10.5
IV 1-1	灰绿-灰黄色粉质黏土	2.6	0.34	6.60	19.80	2 031	21.5	41.5
IV 4	灰-灰黄色粉细砂	7.9	0.32	12.00	36.00	1 959	35.5	1.0
IV 2	灰-灰绿色黏土	4.3	0.31	8.00	24.00	1 929	15.0	25.0
V 1	杂色黏土	3.3	0.35	8.00	24.00	2 041	21.0	45.0
V 3	灰绿-褐黄色黏性土混砂砾	3.7	0.35	8.00	24.00	2 071	23.5	47.0
V 2	杂色粉质黏土	—	0.35	7.50	22.50	2 061	21.0	47.5

2.2 模型建立

1) 结构建模

研究对象选取拱式纵梁码头结构,上部为混凝土结构,桩基为钢管桩,土体按照实际情况建模,全部采用三维实体单元。用于承担拱推力的拉杆和吊杆则是采用梁单元。采取材料力学性能指标见表2。

表2 建模材料力学参数汇总表

Table 2 Mechanical property of modeling materials

构件名称	材料名称	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量/MPa	泊松比 ν
上部结构	混凝土 C30	2 500	3×10^4	0.2
钢管桩	普通碳素钢	7 850	2.1×10^5	0.3
拉杆、吊杆	普通碳素钢	7 850	2.1×10^5	0.3

2) 荷载与约束

本文研究船舶异常靠泊时,码头受撞击力作用的动力响应特性。设置在模型上的荷载分别为重力及船舶撞击力。根据 JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》:满载排水量大于10万t的船舶法向靠泊速度一般需控制在0.06~0.15 m/s以内。而在异常靠泊情况下,船舶靠泊速度按文献[6]选取控制在0.45 m/s左右,撞击荷载作用时间为1.0 s。该模型计算时撞击力采用动力时程曲线的分析方法,加载时间设定为1.0 s,设计荷载为2 574 kN,放大系数取2.0^[7],加载曲线见图3。根据船舶异常靠泊时的撞击特点,加载位置见图4。荷载作用在中跨时,将排架两端及后端法向自由度约束;

当荷载作用在边跨时,则释放撞击侧的自由度约束,分别对两种情况进行隐式动态分析计算。

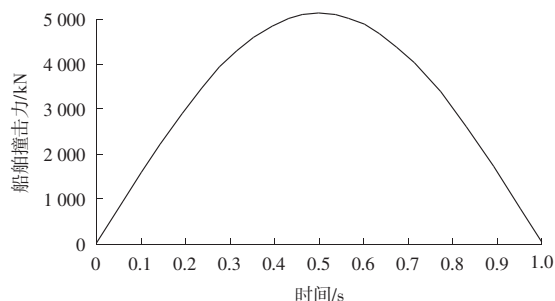


图3 船舶撞击力输入时程曲线

Fig. 3 Curve of the ship's impact force

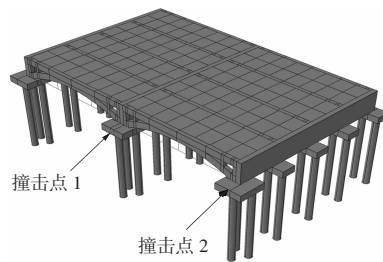


图4 撞击点示意图

Fig.4 The impact's site

3 计算结果分析

3.1 动力时程分析方法验证

选取撞击中跨情况下,结构出现变形差最大的部件进行分析。离受力点最近的桩靠陆侧出现了最不利的水平横向位移,其中0 s时变形差为12.3 cm,1 s时变形差为12.5 cm。

由于该结构在水平横向非对称,导致重力作用影响结构在其方向的位移,所以在分析时需要先将重力引起的水平横向位移扣除。分析后得出水平横向位移时程曲线见图5。

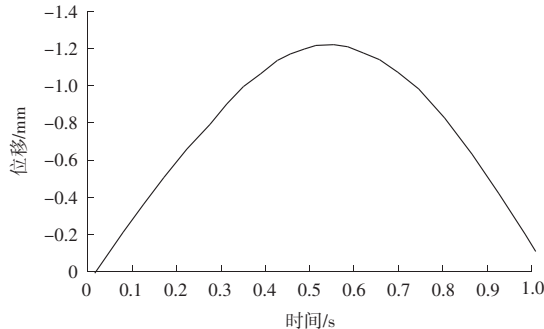


图5 桩顶水平横向位移时程曲线

Fig. 5 Curve of the horizontal displacement of pile block

分析可见,位移时程曲线与动力时程曲线呈正相关关系,符合规律。所以本文分析拱式纵梁码头结构在船舶撞击作用下的响应情况时,所采用的动力时程分析方法可行。

3.2 上部结构分析

根据 ABAQUS 软件分析结果绘制上部结构应力时程曲线见图6,并对其进行分析。

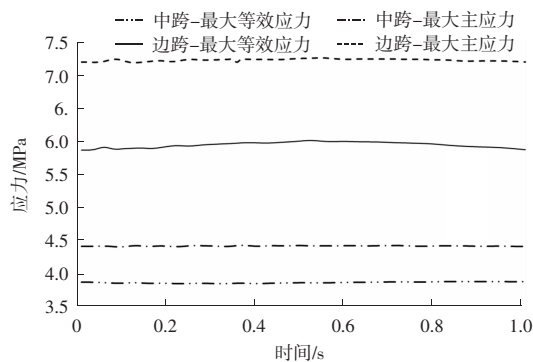


图6 上部结构应力时程曲线

Fig. 6 Stress curves of the upper structure

1) 等效应力分析

船舶撞击力作用在中跨时,上部结构等效应力最大值出现在横梁与第二排边墩台交界处,最大等效应力值为 3.882 MPa;当撞击力作用在边跨时,上部结构等效应力最大值出现在第三排拱形纵梁的上弦杆与拱圈梁夹角处,其值为 6.01 MPa。

两种情况下上部结构的最大等效应力均未超过混凝土材料的屈服应力 30 MPa,说明材料承载能力仍有富余,符合要求。

2) 主应力分析

上部结构相对于码头结构横断面是对称结构,并且船舶撞击力作用在中跨,故最大主应力出现的位置也相对于码头结构横断面对称,此时最大主应力值为 4.432 MPa,位置为第二排拱形纵梁的上弦杆与拱圈梁夹角处。撞击力作用在边跨时,上部结构的主应力最大值点则出现在受力侧第三排拱形纵梁的跨中位置,最大值为 7.253 MPa。

3) 比对分析

综合两组应力情况进行分析,可得知荷载作用在边跨情况下,引起的码头上部结构应力最大值是荷载作用在中跨时的 1.55~1.6 倍,这是因为受力侧一端为自由端,导致码头结构受到较大弯矩作用,应力也随之增大。此外在结构设计时拱圈梁和上弦杆两个部件之间会形成一个 16° 的夹角,在受力过程中容易出现应力集中的现象。为了防止船舶异常靠泊时可能造成的破坏,在前期建设时可以对此处进行加固,避免出现过小夹角引起集中应力导致构件受力不均最终破坏的现象。

3.3 桩基结构分析

根据 ABAQUS 分析结果绘制出桩基结构应力与变形情况时程曲线见图7、图8,并作出分析。

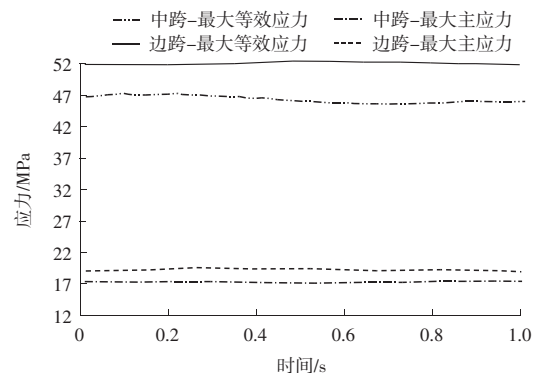


图7 桩基结构应力时程曲线图

Fig. 7 Stress curves of pile foundation

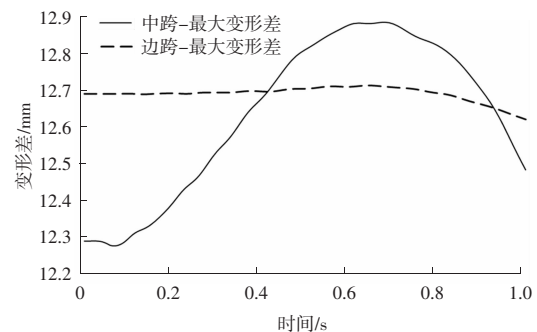


图8 桩基结构变形差时程曲线

Fig. 8 Curves of the deformation difference of pile foundation

1) 等效应力分析

撞击力分别作用在中跨与边跨时, 桩基结构的最大等效应力点皆出现在与受力点距离最近的桩顶处。最大等效应力值分别为 47.29 MPa 和 52.43 MPa, 远小于普通碳素钢的屈服应力 235 MPa, 说明构件满足承载力要求。

2) 主应力分析

当撞击力作用在中跨时, 桩基结构最大主应力出现在结构后方的边桩桩顶, 最大值为 17.37 MPa; 当撞击力作用在边跨时, 桩基结构的最大主应力出现在撞击侧边桩桩顶, 最大值为 19.53 MPa。

3) 水平横向位移分析

根据计算云图显示, 以上分析讨论的两种情况下, 桩基结构出现变形最大的部位均为离受力点最近的桩靠陆侧, 最大水平横向变形值分别为 12.88 mm 和 12.71 mm。

以荷载作用在中跨为例, 当考虑重力作用时, 单根桩的位移差最大可达到 12.88 mm; 不考虑重力作用时, 单根桩的位移最大值不超过 6 mm。研究比对可知, 在该结构中, 重力作用会引起靠海侧桩墩台向海侧扭转, 使得结构在水平横向上的位移相对较大。

4) 比对分析

码头建成后, 后方陆域对前沿结构有支撑约束作用, 当动力时程曲线中力的荷载达到最大时, 变形最大的位置出现在桩身上部(距桩顶 5~7 m)而不是桩顶; 由于土体对桩基的约束作用, 离土层越近, 其位移越小。桩基入土深度小于 20 m 的部分和土同时有较小位移; 而入土深度大于 20 m 的部分, 桩基位移基本趋于 0, 土的反力作用使得其位移时程曲线与动力时程曲线不再呈正相关关系。

4 结语

本文利用 ABAQUS 软件建立三维实体模型, 考虑桩土的相互作用, 对拱式纵梁码头标准结构段在异常靠泊时的船舶撞击力作用下的动力响应特性进行分析, 并分别从各构件的力学特性切入进行比对研究, 得出如下结论:

1) 通过动力时程分析方法的验证, 得到了码头结构在船舶撞击力作用下, 使用半正弦动力时程曲线进行动力分析的正确性, 为今后进一步研

究拱式纵梁码头结构在撞击力作用下的动力响应特性提供了有效的方法。

2) 通过对上部结构的等效应力、最大主应力的分析, 得出在船舶异常靠泊时, 拱式纵梁结构中拱圈梁与上弦杆的夹角处, 会出现应力集中。在前期建设时可以对此处进行加固, 避免集中应力导致构件受力不均最终破坏的现象。

3) 通过对桩基结构的等效应力、最大主应力以及桩身挠度的分析可知, 船舶异常靠泊时造成的撞击力作用对码头桩基结构的影响相对于重力作用较小。所以在进行拱式纵梁码头结构动力响应计算分析时, 只要桩基结构满足码头自重的承载能力要求, 船舶撞击力的作用可以考虑不计。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[N]. 人民日报, 2016-03-18(001).
National Development and Reform Commission. The 13th 5-year plan for economic and social development of the people's republic of China[N]. People's Daily, 2016-03-18(001).
- [2] 翟秋, 鲁子爱. 一种拱式纵梁码头结构: 中国, CN202157300U [P]. 2012-03-07.
ZHAI Qiu, LU Zi-ai. A new type of wharf structure with arched longitudinal beams: China, CN202157300U [P]. 2012-03-07.
- [3] ZHAI Qiu, LU Zi-ai, ZHANG Shu-hua. Study on structure of arched longitudinal beams of deep-water wharf[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(4): 705-711.
- [4] 李申, 钟小帅. 高桩码头异常靠泊有限元仿真模拟[J]. 水运工程, 2012(1): 64-68.
LI Shen, ZHONG Xiao-shuai. Nonlinear finite element study on damage of high-pile wharf's abnormal berthing[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(1): 64-68.
- [5] 魏乐永. 拱式结构体系研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
WEI Le-yong. Study on arch bridge structure system[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [6] 刘昌凤, 滕斌, 张俊生, 等. 码头前系泊船舶撞击速度研究[J]. 水道港口, 2011(3): 161-167.
LIU Chang-feng, TENG Bin, ZHANG Jun-sheng, et al. Impact velocity of a moored ship [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011(3): 161-167.
- [7] 刘红彪, 李宏男. 船舶撞击作用下考虑桩-土相互作用的高桩码头结构动力响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015(1): 50-57.
LIU Hong-biao, LI Hong-nan. Study on dynamic response of high-piled wharf under ship impact load considering pile-soil interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015 (1): 50-57.