



# 不规则波作用下高桩码头结构面板 动力响应计算分析

方辰<sup>1</sup>, 欧阳峰<sup>2</sup>, 黄海龙<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院勘测设计院, 江苏南京 210024; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210029; 3. 南京水利科学研究院河港研究所, 江苏南京 210024)

**摘要:** 以物理模型试验对应的原型高桩码头单面板及整体结构为研究对象, 通过有限元计算软件ABAQUS建立其有限元分析模型, 并针对码头单面板及整体结构进行静动力计算, 研究分析不同波浪类型、不同作用频率下码头单面板及整体结构动力响应的影响, 对比分析采用不同简化荷载计算的合理性。

**关键词:** 高桩码头; 面板; 波浪; 动力响应

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0068-05

## Calculation and analysis of high-pile pier's panel dynamic response under action of irregular waves

FANG Chen<sup>1</sup>, OUYANG Feng<sup>2</sup>, HUANG Hai-long<sup>3</sup>

(1. Survey & Design Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210094, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China;

3. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The prototype high-pile pier panel corresponding to the physical model test is used as the object of study, by finite element analysis software ABAQUS to establish the finite element analysis model, and according to the static and dynamic calculations for single pier panel and the whole structure, this paper studies the dynamic response of the single panel and the whole structure in different types of waves and the different simplified loads.

**Key words:** high-pile pier; panel; wave; dynamic response

随着船舶吨位的增加, 目前越来越多的新建码头工程不得不建设在动力条件恶劣的外海开敞海域。与近岸海域码头相比, 建设在外海开敞海域的透空式码头结构面板底部受到波浪荷载冲击而产生破坏的风险更大。大量的研究成果表明, 作用于透空式码头面板底部的波浪上托压强通常由一个冲击型压强和一个缓变型压强组成<sup>[1-2]</sup>。其中冲击压强数值巨大且作用时间极短, 通常当码头面板底部距静水位高度为入射波高的0.15~0.5倍作用时达到最大值。例如河海大学过达等<sup>[3]</sup>在试验

中测得最大波浪上托压强对推进波变化范围可从 $1.5\rho gH$ 变化到 $3.0\rho gH$ , 对破碎波高作用情况下更可达 $6.3\rho gH$ , 而其作用时间通常介于入射波浪周期的 $1/50 \sim 1/100$ 之间。波浪上托压强通常在码头面板底部距静水位距离为入射波高的0.1~0.4倍时达到最大值, 而当码头面板底部超高大于0.4倍入射波高后迅速减小, 因此, 工程上为了避免如此巨大的自下而上的波浪冲击荷载作用, 通常通过调整码头面板底部高程, 使得码头面板底部超高高于一定数值。例如, 我国的JTJ 211—1999《海港总

收稿日期: 2012-05-18

作者简介: 方辰(1974—), 男, 工程师, 从事水运工程设计工作。

平面设计规范》规定, 开敞式码头面板底高程必须高于 50 a 一遇波列累计频率为 1% 的波高作用下波面可能达到的高度。码头面板底高程的增加, 能够有效地减少波浪对码头面板底部的冲击, 减小波浪上托压强设计荷载, 避免码头面板双向配筋。但是码头面板底部高程的增加使得整个码头面板高程增加, 从而直接增加码头结构工程量。由于目前大多港口工程后方陆域采用吹填等方式造地, 码头面高程的增加使得后方陆域回填土工程量也相应增加。对于这种数值巨大的波浪冲击压强, 其动力荷载特征十分明显, 往往在极短的时间内结构还未完全反应荷载作用便消失了, 由此产生的码头结构内力可能并不很大, 将其完全等效为静力荷载来进行码头结构内力计算似乎太过保守。另一方面, 由于波浪上托压强频率变化较大, 持续的波浪上托压强作用是否会在码头结构内部产生激励共振, 从而威胁码头结构安全也是设计人员必须关心的内容<sup>[4]</sup>。因此, 本文以透空式码头结构为研究对象, 利用 ABAQUS 软件对不规则波浪荷载作用下的高桩码头结构的面板动力响应特性进行系统研究, 从而为这种码头结构的安全使用提供一定参考。

## 1 随机波浪荷载

研究波浪上托压强作用下高桩码头面板结构的动力特性, 首先必须获得面板结构随时间变化的波浪上托压强作用过程。由于波浪控制方程的非线性以及码头结构边界的复杂性, 波浪作用码头面板结构瞬间是一个高度的随机非线性行为, 因此很难通过理论研究和数值模拟的方法获得准确的波浪上托压强过程。而物理模型试验能复演各种复杂的海洋环境条件, 试验过程具有一定的直观性, 往往能得到相对理想的分析结果, 多年来一直是研究波浪与建筑物相互作用课题的重要手段之一。因此, 本文根据研究需要, 对某高桩码头结构进行物理模型试验, 用以为码头结构面板的动力分析提供波浪上托压强时程曲线。

### 1.1 试验设备及试验方法

本次物理模型试验在河海大学海岸灾害与防护教育部重点实验室波浪水槽内进行, 该水槽长

80 m, 宽 1 m, 高 1.2 m。水槽的一端安装有液压式推板造波机, 通过电机系统控制推波板运动的行程和频率, 水槽的另一端铺设消能缓坡, 以减小和消除波浪反射影响。

高桩码头结构试验模型采用正态模型, 根据中交水运规划设计院有限公司提供的日照港石臼港区四、五期码头工程项目中的嵌岩全直桩码头结构原型按照长度比尺 1:30 制作, 并在码头模型面板底部布置若干压力传感器, 用以测量波浪上托压强时程曲线, 整个试验过程模型布置如图 1 所示。

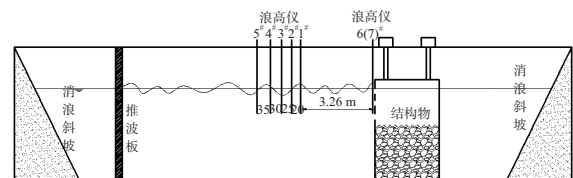


图 1 高桩码头结构试验模型布置

试验按照《波浪模型试验规程》进行, 试验采用不规则波, 波谱取 JONSWAP 谱, 按正态重力相似准则进行模型试验, 试验长度比尺  $\lambda=30$ 。

由于日照港石臼港区不同水位不同重现期条件组合下波浪要素较多, 而实际工程中最关心的是使结构产生最危险情况下所对应的波浪荷载, 因此本次试验根据日照港区实际波浪要素及潮位进行组合, 选择日照港区极端高水位条件下 50 a 一遇设计波要素以及设计高水位条件下 50 a 一遇设计波要素, 并按照长度比尺来进行模型试验 (表 1)。

表 1 试验不规则波要素

试验组次	试验水深/cm	有效波高/cm	平均波周期/s
1	68.1	14.3	1.62
2	68.1	10.7	1.62
3	64.4	13.8	1.62
4	64.4	10.0	1.62

### 1.2 数据采集及分析

本次波浪上托压强试验数据的测量和采集均使用北京水利水电科学研究院研制的 DJ800 型多功能监测系统, 采用间隔 0.012 8 s。

通过物理模型试验得到模型中波浪上托压强时程曲线, 然后根据重力相似理论 (长度比尺 1:30), 将压力值乘以 30, 时间乘以  $\sqrt{30}$ , 换算

得到原型波浪上托压强时程曲线。本次研究选取第3组试验组次对应原型（设计高水位4.73 m，水深19.32 m， $H_s=4.14$  m， $\bar{T}=8.9$  s）波浪作用下一段时间内的码头面板作用上托压强时程曲线作为波浪作用下码头面板动力响应计算荷载，如图2所示。

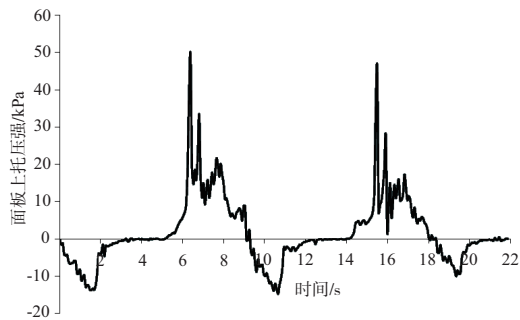


图2 码头面板作用上托压强时程曲线

整个试验过程中发现，作用于一定距离静水位之上码头面板底部的波浪上托压强一般由一个瞬时冲击压强和一个缓变压强组合而成。瞬时冲击压强通常表现为一个数值巨大的单峰冲击作用，其作用频率极高，受到压力传感器本身及采样频率的限制，本次试验采集到的波浪冲击压强频率约为70 Hz，国内外相关人员研究发现其频率最大可能达到100~200 Hz；缓变压强数值较小，变化缓慢，其频率跟入射波浪频率基本一致。

## 2 结构计算模型

分别针对单块面板和码头整体结构建立模型采用ABAQUS软件进行结构计算。

### 2.1 单块面板计算模型

选择码头结构前沿一块面板建立计算模型，面板原型几何尺寸为9.68 m（横向）×8.8 m（纵向）×0.6 m（厚度）。应用ABAQUS有限元计算分析软件建立计算模型，面板混凝土采用线弹性模型，原型混凝土强度等级为C40，计算中弹性模量、泊松比、密度分别取 $3.25 \times 10^4$  MPa，2 450 kg/m<sup>3</sup>，0.167。边界条件按照四边固结考虑计算。面板划分单元采用八节点六面体三维实体单元（C3D8R）。码头面板计算模型如图3所示。

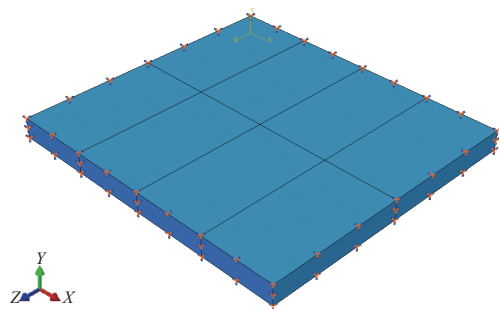


图3 码头面板有限元计算模型

### 2.2 高桩码头空间结构计算模型

基于码头纵向结构和荷载的相似性，选取典型的10 m排架建立模型，分析的区域岸坡底宽为90 m，高15 m，土体与桩、梁、板均采用实体单元模拟。各种材料物理参数见表2。

表2 材料物理参数

材料	弹性模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
混凝土	$3.25 \times 10^4$	2 450	0.167
花岗岩体	$3.00 \times 10^4$	2 500	0.300
回填块石	$1.20 \times 10^4$	1 800	0.270

岸坡土体、混凝土板和桩划分网格时采用线性四面体C3D4，模型中混凝土板与桩顶之间、桩底和土体之间采用约束命令（Constraint）中的Tie命令将其共有的节点自由度完全耦合起来，桩底和土体之间，桩侧面和土体之间设置接触模拟桩土之间的相互作用。土体左边界和右边界为垂直于该面的链杆约束，前后面为垂直于该面的链杆约束，底面 $z=0$ 为固定约束。码头整体结构计算模型及单元划分如图4所示。

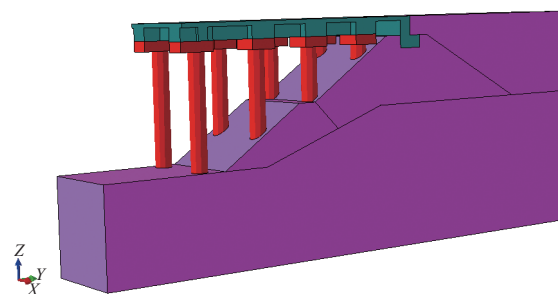


图4 码头整体结构有限元计算模型

## 3 高桩码头面板动力特性计算

### 3.1 计算组次

1) 结构动力特性计算：分别考虑单面板和码

头整体结构模型进行模态分析, 确定码头的固有频率和振型。

2) 针对码头面板的结构动静力计算: 为了研究分析该高频瞬时冲击压力对码头面板的影响, 需对面板结构进行动力响应分析。将图2所示的波浪力时程曲线人工处理成缓变波浪力、冲击波浪力和合成波浪力等3组波浪力时程曲线, 如图5~7所示, 并分别对该3组波浪力作用下的结构动力时程响应进行动力计算分析。

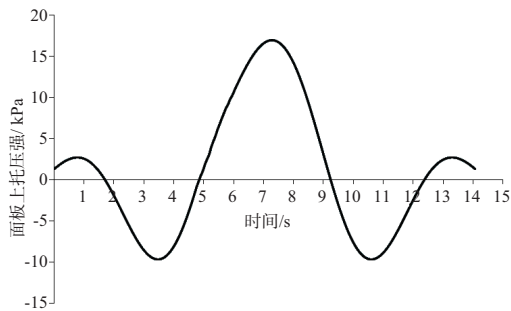


图5 缓变波浪压强时程曲线

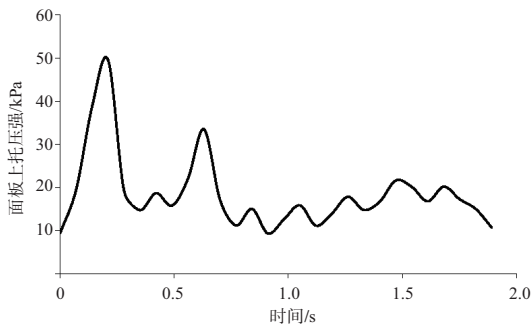


图6 冲击波浪压强时程曲线

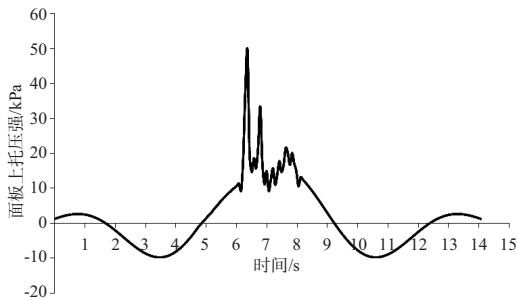


图7 合成波浪压强时程曲线

3) 波浪力冲击载荷频率对结构动力响应: 对某一典型冲击载荷进行改造, 保持峰值载荷值 49.48 kPa 不变, 改变冲击载荷的频率, 研究冲击载荷频率对结构动力响应的影响规律。

### 3.2 计算结果

#### 3.2.1 动力特性计算结果

对单面板和空间整体模型分别进行模态分

析, 得到单面板结构和码头整体结构的动力特性, 其前5阶自振频率如表3所示。

**表3 结构前5阶自振频率计算结果**      Hz

阶数	单面板自振频率	码头整体结构自振频率
1	39.40	12.98
2	73.80	18.25
3	82.40	18.93
4	112.00	21.40
5	126.00	21.71

从表2可以看出, 单面板结构由于采用了四边固定的约束条件, 其自振频率较整体结构大。

#### 3.2.2 缓变与冲击波浪压强计算结果比较

根据有限元计算软件 ABAQUS 的静力计算模块和瞬态动力学计算模块得到静力、缓变、冲击和合成波浪上托压强过程作用下码头面板中心点位移响应如表4所示。

表4 不同类型波浪上托压强作用下码头面板中心点位移计算结果

项目	作用压强/kPa		位移/mm		位移/作用压强/(mm·MPa <sup>-1</sup> )	
	单面板	整体	单面板	整体	单面板	整体
静力一	16.98	16.98	0.280	0.159	16.47	9.36
静力二	49.48	49.48	0.815	0.463	16.47	9.36
缓变波浪压强	16.98	16.98	0.278	0.157	16.38	9.25
冲击波浪压强	49.48	49.48	0.824	0.274	16.65	5.54
合成波浪压强	49.48	49.48	0.814	0.275	16.45	5.56

从表3可以看出, 单面板结构在缓变、冲击和合成波浪压强作用下产生的最大位移动力响应与静力值大体相当, 而考虑整体结构, 面板在缓变波浪压强作用下产生的最大位移动力响应与静力值相差不大, 而在冲击和合成波浪压强作用下产生的最大位移动力响应约为静力计算值的0.6倍。

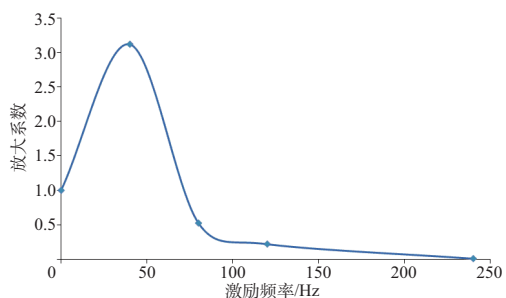
#### 3.2.3 波浪力冲击载荷频率对结构动力响应影响

调整冲击载荷频率, 分别计算不同频率冲击波浪压强下产生的最大位移动力响应, 考虑到单面板结构和整体结构的自振频率不同, 单面板结构选择 40 Hz, 80 Hz, 120 Hz 和 240 Hz 分别进行瞬态动力响应计算, 整体结构选择 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz 和 40 Hz 分别进行瞬态动力响应计算, 计算结果见表5。

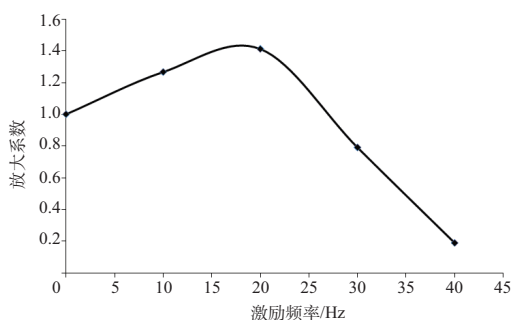
表5 人工模拟高频波浪力作用下的码头面板  
中心点位移动力响应比较

响应类型	位移最大绝对值/mm	位移动力放大系数
静力	0.815	
单 面 板	40 Hz	3.117
	80 Hz	0.526
	120 Hz	0.223
	240 Hz	0.010
静力	0.463	
整 体	10 Hz	1.266
	20 Hz	1.413
	30 Hz	0.790
	40 Hz	0.188

依据表5可以绘出冲击荷载激励频率与位移放大系数相互关系图，见图8所示。



a) 单面板



b) 整体

图8 中心点位移动力放大系数与激励频率的关系曲线

从计算表和图可以看出，对单面板或整体结构而言，面板位移中心点位移放大系数随冲击压强激励频率变化的趋势相似。当冲击波浪力激励频率远低于结构整体自振频率时，动力放大作用很小，动力放大系数趋于1，可按静载荷处理；随着频率的增加，动力放大系数增大，当激励频率达到结构一阶自振频率时，动力放大系数最大，

结构发生共振；之后，随着激励频率的增加，动力放大系数减小并逐渐趋近于0，此时可忽略冲击波浪力的作用。

#### 4 结论

1) 对于四边固结的单面板结构而言，波浪冲击荷载频率约为自振频率2倍，在缓变、冲击和合成波浪压强作用下产生的最大位移动力响应与静力值大体相当，表明此时冲击荷载对面板结构的动力响应放大系数基本与缓变荷载对结构的动力响应放大系数一致。

2) 对码头整体结构而言，其自振频率与波浪冲击频率相差较大，该码头面板在缓变波浪压强作用下产生的最大位移动力响应与静力计算值相差不大，表明此时缓变荷载可按静力方法进行计算；而在冲击和合成波浪压强作用下产生的最大位移动力响应约为静力计算值的0.6倍，且放大系数随冲击压强频率的增加而迅速减小，因此直接将其等效为静力荷载进行结构计算使计算结果偏于保守，实际采用时，可考虑将静力计算结果乘以一定的折减系数。

3) 在计算波浪力上托力对码头结构的作用时，如对单面板强度计算，建议采用波浪上托冲击压强计算值进行验算；而对码头整体结构进行计算时，建议采用波浪上托平均压强进行计算较为合理。

#### 参考文献:

- [1] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 30-40.
- [2] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 斜坡上封闭水平板波浪上托力试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(5): 687-694.
- [3] 过达, 蔡宝华. 透空式建筑物面板波浪上托力计算[J]. 华东水利学院学报, 1980(1): 14-33.
- [4] 卢生军, 陈国平, 严士常, 等. 不规则波作用下桩基-重力式复合结构码头面板的动力特性研究[J]. 水运工程, 2011(11): 32-37.

( 本文编辑 郭雪珍 )