

# 三峡库区墩柱梁板式码头结构特性的模态分析\*

凌霄<sup>1</sup>, 王多银<sup>1,2</sup>, 沈灵<sup>1</sup>, 程烈<sup>1</sup>

(1.重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2.重庆市航运中心, 重庆 400074)

**摘要:** 参照内河墩柱梁板式码头结构形式, 结合实际工程, 采用有限元分析软件, 建立码头含靠船墩排架结构模型, 进行模态分析, 得到该模型的固有频率和相应的振型, 根据码头结构的受力特性, 分析其薄弱环节, 发现靠船墩在有高频的车辆或岸吊载荷垂直激励时会产生较大位移, 为进一步动力分析、结构状态评估以及探讨该结构合理形式提供依据。

**关键词:** 模态分析; 墩柱梁板式码头; 靠船墩; 动力分析

中图分类号: U 656.1<sup>1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0078-04

## Modal analysis on structure of pier beam slab terminal in the Three Gorges reservoir area

LING Xiao<sup>1</sup>, WANG Duo-yin<sup>1,2</sup>, SHEN Ling<sup>1</sup>, CHENG Lie<sup>1</sup>

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Waterway Shipping Research Center of Chongqing, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** With reference to the structural style of inland river pier beam slab terminal, combining with practical engineering, and using the finite element analysis software, we establish the bent model with pier structure, conduct the modal analysis, and obtain the natural frequency and corresponding vibration model. According to the mechanical characteristics of the pier structures, we analyze its weaknesses and find out that under the high frequency incentive of vehicles or quay crane's vertical load, a greater displacement will occur. This provides a basis for further dynamic analysis, structure condition assessment and research of reasonable structure types.

**Key words:** modal analysis; pier beam slab terminal; pier structure; dynamical analysis

三峡工程建成蓄水后, 将极大改善库区航运条件, 但同时也给库区港口码头及其他水工建筑物建设带来极大的影响。届时库区长历时大水深和大变幅水位将给大型船舶的系缆靠泊带来一定的困难, 三峡蓄水后库区码头建设的自然条件、水文条件、施工条件与蓄水前相比差异巨大, 使得以往的内河码头结构形式不再适用。因此, 为适应形式的变化, 在原以斜坡码头结构形式和分级平台结构形式为主的基础上发展了内河高水位差架空直立式新型码头结构形式<sup>[1]</sup>, 这种结构形式受力更为复杂, 控制作用效应的组合种类更多<sup>[2]</sup>; 另外还有重庆纳西沟码头采用的墩柱梁板式结构

形式, 都是在高效建设码头、低成本运营码头, 同时优化码头结构形式、降低风险的要求下做出的一些摸索。杨洪祥等<sup>[3]</sup>对内河架空直立式框架结构做过相应的动态分析, 也针对墩柱梁板式结构做了相应的简化, 采用梁单元和壳单元模拟, 得到了比较有价值的成果。笔者考虑到墩柱梁板式码头结构中承台和墩柱的尺度比较巨大, 若对其采用梁单元模拟分析可能与实际测出的结果有一定的差异, 本文以重庆纳西沟码头结构为例, 采用实体单元模拟承台和墩柱, 建立了码头含靠船墩排架结构的有限元模型, 并对其进行了模态分析, 探讨了墩柱梁板式码头结构形式的动力特性。

收稿日期: 2012-07-04

\*基金项目: 重庆市重大科技专项“交通基础设施”(CSTC, 2009AA6029)

作者简介: 凌霄(1986—), 男, 硕士, 主要从事港口码头水工建筑物的科研。

## 1 模态分析基本原理<sup>[4-5]</sup>

外部振动源的激励会导致结构的共振从而引起疲劳甚至结构破坏,因而对结构自身所固有的自振频率和振型的研究将有利于避免结构在使用过程中因共振造成不必要的损失。所谓的模态分析是将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标,使方程组解耦,成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态参数。这是更为详细的动力学分析(如谱响应分析、瞬态动力学分析、频谱分析)的基础。

一个具有 $N$ 个自由度的线性系统,其振动微分方程为:

$$\mathbf{M} \times \mathbf{x} + \mathbf{C} \times \mathbf{x} + \mathbf{K} \times \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为质量、阻尼、刚度矩阵; $\mathbf{x}$ 及 $\mathbf{F}$ 分别为系统各点的位移响应向量和激励力向量。式(1)是一组耦合方程,当系统自由度很大时,求解十分困难。将耦合方程变化为非耦合的独立方程组,这就是模态分析必须解决的问题。

模态分析方法就是以无阻尼的各阶主振型所对应的模态坐标来代替物理坐标,使微分方程解耦,变成各个独立的微分方程。

对式(1)两边进行拉氏变换,得:

$$s^2 \mathbf{M} + s \mathbf{C} + \mathbf{K} \times \mathbf{x}(s) = \mathbf{F}(s) \quad (2)$$

令 $s=j\omega$ ,则式(2)变为:

$$\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} \times \mathbf{x}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (3)$$

引入模态坐标,令 $\mathbf{x} = \boldsymbol{\varphi} \times \mathbf{q}$ ,其中 $\boldsymbol{\varphi}$ 为振型矩阵, $\mathbf{q}$ 为模态坐标,代入(3)有:

$$\mathbf{K} - \omega^2 \times \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} \times \boldsymbol{\varphi} \times \mathbf{q} = \mathbf{F}(\omega) \quad (4)$$

根据振型矩阵对于质量、刚度矩阵的正交性关系,有:

$$\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \cdot & & \\ & m_i & \\ & & \cdot \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \cdot & & \\ & k_i & \\ & & \cdot \end{bmatrix} \quad (5)$$

若阻尼矩阵也近似被对角化,即有:

$$\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \cdot & & \\ & k_i & \\ & & \cdot \end{bmatrix} \quad (6)$$

则对式(4)前乘 $\boldsymbol{\varphi}^T$ 得:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C}_i) \times \mathbf{q} = \boldsymbol{\varphi}^T \times \mathbf{F} \quad (7)$$

这样,相互耦合的 $N$ 自由度系统的方程组经正交变换,成为在模态坐标下相互独立的 $N$ 自由度系统的方程组,解耦后的第 $i$ 个方程为:

$$(K_i - \omega^2 M_i + j\omega C_i) q_i = \sum \varphi_{ij} \boldsymbol{\varphi}^T F_j \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

式中: $K_i$ 、 $M_i$ 、 $C_i$ 分别为模态刚度、模态质量、模态阻尼; $\varphi_{ij}$ 为模态振型。从式(8)中可知:采用模态坐标后, $N$ 自由度系统的响应相当于在 $N$ 个模态坐标下单自由度系统的响应之和。采用归一化方法,使模态质量归一,记模态质量归一化振型为 $\boldsymbol{\phi}$ ,即:

$$\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} = \mathbf{I} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\omega}^2 \quad (10)$$

可知: $K_i$ 为模态固有频率, $N$ 自由度系统有 $N$ 个固有频率。

## 2 码头工程概况

重庆纳溪沟码头规划4个泊位,其中散货泊位2个,件杂货泊位2个,设计船型为3 000吨级,件杂货泊位兼靠5 000吨级船型。码头水工建筑物采用墩柱梁板式码头结构形式,码头平台长度233.40 m,宽度41.75 m,结构高度约30 m。码头平台前沿墩柱包括6个靠船墩(兼系船)和16个直径3 m的圆形支撑墩,平台中间采用22个直径3 m的圆形支撑墩,平台后方采用16个直径3 m的圆形支撑墩和6个方形支撑墩(长×宽=4.4 m×3.2 m的支撑墩4个,长×宽=6.0 m×3.2 m的支撑墩2个)。第2、5个靠船墩下桩基采用2根 $\phi$  1 800和3根 $\phi$  1 500的钢筋混凝土嵌岩钻孔桩,对应的后方矩形支撑墩下桩基采用5根 $\phi$  1 200的钢筋混凝土嵌岩钻孔桩;其余靠船墩下桩基采用5根 $\phi$  1 500的钢筋混凝土嵌岩钻孔桩,对应的后方矩形支撑墩下桩基采用4根 $\phi$  1 200的钢筋混凝土嵌岩钻孔桩;其余墩柱均采用钻孔灌注施工,直接嵌入中风化基岩。每个横向排架的水平联系梁上设置“人”字形斜梁,以增加横向排架刚度,并减小横梁的计算跨度。墩柱顶部现浇倒T形钢筋混凝土横梁、矩形装卸桥轨道梁和一般纵梁,然后现浇码头面板。2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>靠船墩排架结构形式见图1,2。

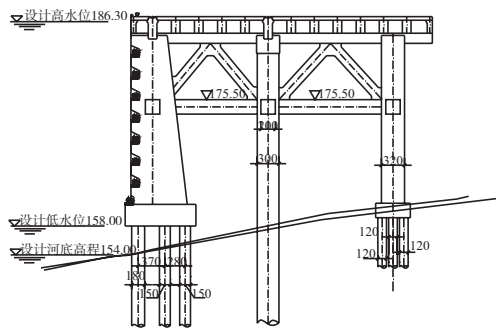


图1 2#靠船墩排架横断面

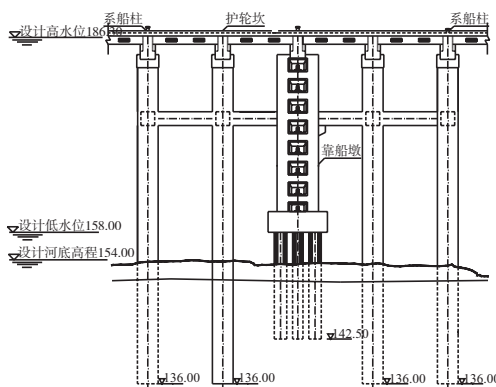


图2 5#靠船墩排架纵断面

### 3 有限元模型建立

取2#靠船墩所在的排架为中心建立4跨5榀排架，靠船墩和后方支撑墩以及下面的承台采用3D钢筋混凝土实体元solid65模拟，码头面板采用弹性壳单元shell63模拟，其它构件如桩、横梁、人字撑及横撑均采用3D二次有限应变梁单元Beam189模拟，梁单元与实体单元之间采用节点约束耦合。建模时钢筋混凝土弹性模量取31.5 GPa，泊松比取1/6，密度取2 500 kg/m<sup>3</sup>。采用映射网格划分共27 262个单元，33 420个结点。

计算自重时考虑重力加速度为9.8 m/s<sup>2</sup>，结构计算模型均将桩基嵌固点设置为固结，约束其各个方向自由度。码头接岸结构处约束y方向自由度。

### 4 模态分析结果

一般说来，结构系统的固有频率处于激励荷载频率附近的那些模态的贡献最大，远离激励频率的那些模态的贡献愈来愈小<sup>[6]</sup>，只要考虑那些贡献大的模态已经可以满足实际工程的需要，且高阶模态不容易被激发。通过计算发现结构前7阶在x,z方向的振型贡献率均超过了90%，因此，在实际计算中，取码头结构前7阶模态进行分析，将使得求解计算量大大减少。本文对码头含靠船墩排架

架结构模型分别提取了前7阶模态及相应的频率。其中 $f$ 为码头结构的固有频率， $U$ 为码头结构的最大振幅。采用ANASYS有限元软件对码头含靠船墩排架结构模型进行模态分析计算。采用分块兰索斯法提取模态，得到码头结构前7阶模态分析的固有频率及最大振幅，如表1所示。

表1 码头结构固有频率和最大振幅

阶数	固有频率/Hz	最大振幅/mm
1	1.110 3	0.294
2	1.188 5	0.229
3	1.353 3	0.420
4	4.871 1	0.817
5	5.683 1	0.840
6	6.360 0	0.882
7	6.651 5	0.621

观察各阶模态频率的变化趋势，发现第1阶到第3阶以及第4阶以后频率变化不大，但是第3阶和第4阶模态之间存在着频率的跃升，体现了从简单振型到复杂振型相应刚度的急剧变化，反映出结构在不同振型下刚度差异。码头结构振型见图3~8。

由振型图可以看出，码头结构的第1，2阶振型主要是以桩基嵌固点为固定端的水平方向的振动。高阶振型主要是前后墩柱承台与下部桩基连接处的水平振动，并伴随其他桩基的轻微弧形弯曲以及码头面板的小幅竖向振动，该阶模态有车辆或岸吊载荷的垂直激励时，在振动响应中占有主导性作用，容易引起码头结构自振破坏。码头

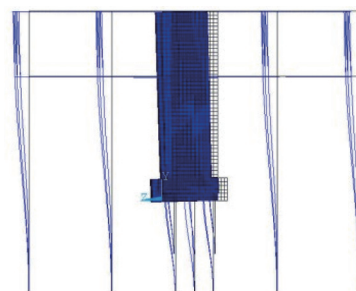


图3 第1阶模态振型

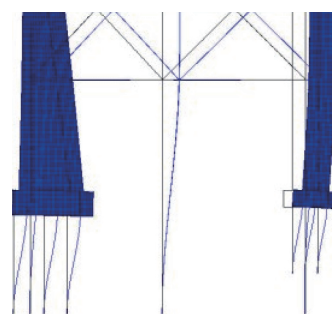


图4 第2阶模态振型

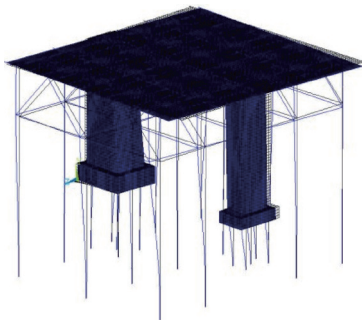


图5 第3阶模态振型

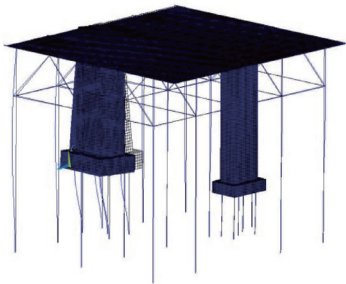


图6 第4阶模态振型

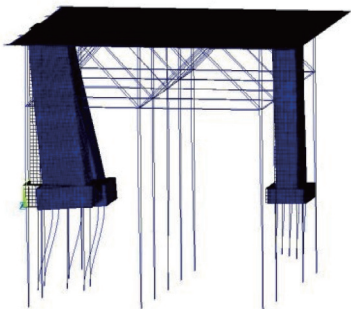


图7 第5阶模态振型

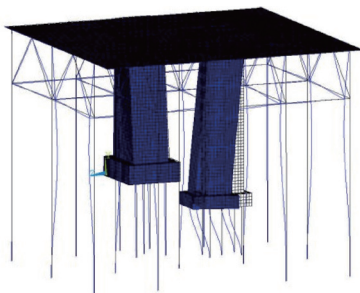


图8 第6阶模态振型

结构模态随模态阶数的分布呈明显的分段集中,具有良好的整体性。对于码头结构要尽量避免出现频率在1.11~1.35 Hz和4.87~6.65 Hz(表1)范围内的激励源。

## 5 结论

1) 根据码头结构各阶模态分析结果显示,码头结构自振时最大振幅出现在第6阶,仅为

0.882 mm,说明码头结构刚度特性很好。

2) 码头结构模型的前3阶振型频率(基频)接近1 Hz,结构振型表现为水平面内振动,前3阶的振型贡献率已达到90%,当有船舶载荷水平激励时容易受到激发,将在振动响应中占有主导性的作用,在实际系靠泊操作中应该规范管理,尽量避免码头结构产生共振破坏。

3) 码头含靠船墩排架结构模型比不含靠船墩排架结构模型具有更高的基频,说明靠船墩增大了码头结构的纵横向刚度,这种新结构满足设计使用要求。虽然靠船墩的振型位移偏大,但都是出现在前墩承台或后墩承台与桩基耦合的地方,在动力载荷效应下容易发生破坏,设计时有必要加强承台下桩基的刚度或增设桩基之间联系,使其联合受力。

4) 比较结构各阶振型,码头含靠船墩排架结构模型除了桩基与承台连接处位移偏大,其余构件的振型位移相对很小,说明靠船墩良好的动力特性不仅发挥了其系靠船的功能,承担了绝大部分水平载荷,明确了码头结构的受力,也提高了码头整体稳定性,因此墩柱梁板式码头结构在库区具有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 虞杨波,王多垠,刘祚飞,等.大水位差架空直立式码头平面框架结构水平承载力分析[J].水运工程,2008(2):55-61,65.
- [2] 王多垠,石兴勇,丁德斌,等.内河架空直立式集装箱码头结构计算中的作用效应组合探讨[J].中国港湾建设,2005(4):37-39.
- [3] 杨洪祥.三峡库区变动回水区新型架空直立式码头结构形式及其力学性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [4] 傅志方.振动模态分析与参数辨[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [5] 傅志方,华宏星.模态分析理论与应用[M].上海:上海交通大学出版社,2000.
- [6] 刘晶波,杜修力.结构动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [7] 包世华.结构动力学[M].武汉:武汉理工大学出版社,2005.
- [8] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

(本文编辑 武亚庆)