

大水位差高桩框架码头结构优化研究

诸云鹏¹, 李唯一¹, 陈达¹, 欧阳峰¹, 汤益佳²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 高桩框架码头是高桩码头的结构形式之一, 近年来, 直立式框架码头已成为长江中上游地区很多码头工程优先考虑的结构形式之一。本文以云南省格勒旅游中心码头工程为例, 采用有限元方法研究框架层数和竖向斜撑对高桩框架码头的具体影响。结果表明, 综合考虑码头的变形和应力和工程量, 框架码头的层高在 6 ~ 10 m 为宜, 同时在减少框架层数的基础上增加竖向斜撑既能减小结构的变形及应力, 增加结构的整体稳定性, 也能减少工程量, 保证工程的经济性。

关键词: 大水位差; 高桩框架码头; 结构优化; 竖向斜撑; 有限元

中图分类号: U656.1 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2022) 12—0045—03

直立式高桩框架码头结构能够很好地适应大水位差、大水深条件, 同时结构安全可靠, 整体性好。但由于其存在框架结构复杂, 纵、横联系撑较多, 桩基布置密集, 经济性较差等问题, 限制了其在内河航道的推广应用, 故需要对它的结构型式、受力特性、经济性等方面进行深入研究。

王多垠等^[1]通过对已建内河直立式框架码头存在问题开展研究, 提出粗桩大跨架空直立式码头结构型式的设计理念, 即通过增加码头排架间距, 加大桩径的方式来使码头受力更加明确, 减少工程量, 为库区码头建设提供良好的技术支撑。周泽祥^[2]提出带主斜撑排架与空间三角框架墩相结合的内河高桩框架码头结构型式。沈倩^[3]研究大水位差高桩框架式全直桩码头设计优化, 比较了不同系缆层、不同排架数量、不同平台设计宽度对结构水平力的影响。

本文以云南省东川港格勒旅游中心码头工程为例, 通过有限元软件 Ansys 计算, 定量分析框架层数的改变对码头变形和应力的影响, 达到结构优化的目的, 为大水位差码头建设提供技术指导和支撑。

1 工程概况

1.1 工程概况

工程位于云南省昆明市东川区小江与金沙江的交汇口。码头采用高桩框架结构, 尺寸为 161.4 m × 96.4 m × 32 m, 中间段码头纵向布置 6 跨, 横向布置 11 跨, 码头顶面高程为 827.50 m, 具体码头结构及尺寸见图 1。水位较高时船舶停靠在小江侧; 水位较低时船舶停靠金沙江侧。本文选取该工程典型分段, 重点分析该段受自重、平台荷载、船舶撞击力等荷载条件时在最不利荷载组合下的受力特性和结构优化。

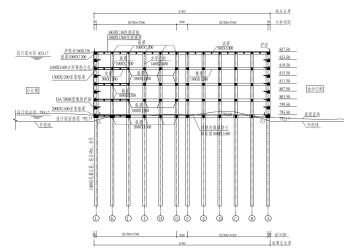


图 1 码头设计断面图

1.2 荷载情况

码头主要荷载类型及大小见表 1。

表 1 荷载类型及大小

荷载名称	荷载大小
结构自重	混凝土重度 $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$
面板恒载	1.5 kN/m^2
平台活载	2 kN/m^2 (水下平台)
船舶撞击力	860 kN
车辆荷载	320 kN

2 有限元模型建立

根据工程方案, 利用 Ansys 建立码头中间段三维有限元模型见图 2, 模型中桩基和主体框架均为钢筋混凝土结构, 钢筋混凝土结构中存在着钢筋和混凝土两种不同弹性模量的材料, 故参数均采用等效复合参数^[4]。混凝土强度等级为 C30。为减少边界效应影响, 土体计算模型边界范围设置为: 285 m × 174 m × 53 m。这些模型均采用实体 Solid187 单元类型, 共包括 144087 个单元, 307462 个节点。

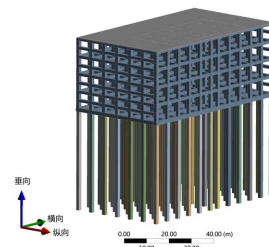


图 2 原设计方案三维模型

本工程桩基为端承桩，不考虑桩基的侧向摩擦，桩土接触设置为面-面接触，构件单元接触面间施加绑定约束。模型中主体框架等混凝土结构均按各向同性弹性材料考虑，钢筋混凝土材料密度为 2500 kg/m^3 ，弹性模量为 30 GPa ，泊松比为 0.167 。

按照《高桩码头设计与施工规范》(JTS 167-1-2010) [5] 进行作用效应组合确定最不利工况。模型的计算工况为高水位工况(设计高水位为 820 m)，船舶撞击力作用在最边跨横向排架顶部，考虑恒荷载、活荷载、船舶撞击力作用。

3 框架码头层数对应力及变形的影响

本节将重点围绕框架结构层数对码头应力及变形产生的影响进行计算分析，进行框架层数优化，计算结果显示桩基部分产生的应力和变形均在设计允许范围之内，故重点考虑上部框架结构。

3.1 设计方案荷载条件下有限元分析

在图2三维模型基础上开展有限元分析计算，原设计方案荷载条件下计算结果如图3所示：

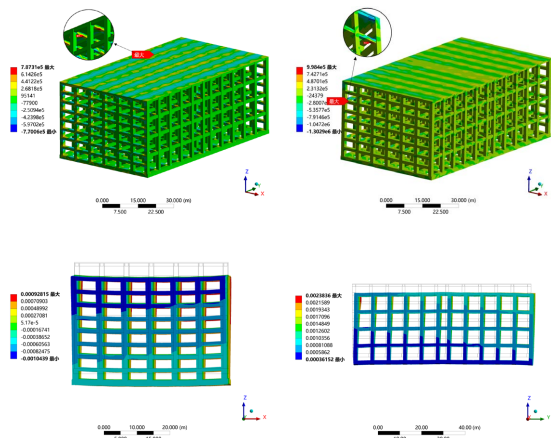


图3 原设计方案应力及变形云图

由图3可知：原设计方案产生的变形和应力均在钢筋混凝土结构设计允许范围之内，码头主体框架结构的纵向最大拉应力出现在顶层边跨纵梁底部，横向最大拉应力出现在距离船舶撞击力作用点位置最近的横梁与立柱交界位置，横向变形主要来源于船舶的撞击力，纵向变形主要来源于船舶撞击力产生的码头整体旋转。

3.2 框架层数影响

原码头设计方案为四层，在不改变总高度的情况下，改变框架层数。计算选取纵向最大拉应力、横向最大拉应力、纵向最大位移、横向最大位移四个指标进行对比，计算结果见图4和图5。

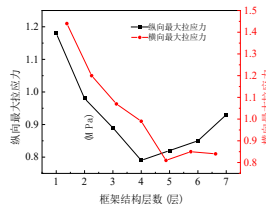


图4 最大拉应力随层数变化

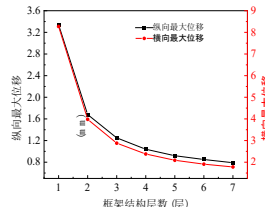


图5 最大位移随层数变化

由图4和图5可知：

(1) 随着层数增加，其纵、横向最大拉应力和纵、横向最大位移均逐渐减小，并且减小的幅度逐渐降低，这是由于随着层数的增加，框架结构的整体性、稳定性都增加。

(2) 当层数的增加到一定程度，其两个方向的最大拉应力均有增大的趋势，原因是随着层数的增加，最大拉应力的位置由原本的纵横梁底部转移到了纵横梁与立柱的交界处，应力集中现象更加明显。

(3) 框架层数过少会导致结构整体性差，产生较大应力和变形；同时层数过多会导致梁柱之间的应力集中现象更加严重。综合考虑框架码头每层高度在 $6 \sim 10 \text{ m}$ 之间为宜。

4 码头结构优化

4.1 优化方案研究

本节在层数优化的基础上，选取三层码头继续优化，改善其变形和应力。为弥补框架码头减少层数对刚度的影响，现考虑沿码头横向方向，从边跨开始隔跨布置竖向斜撑 [6,7]，共布置四跨竖向斜撑，形状为对角“Z”字形竖向斜撑 ($0.8 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$)，共计增加 84 根“Z”字斜撑，结构断面见图6。

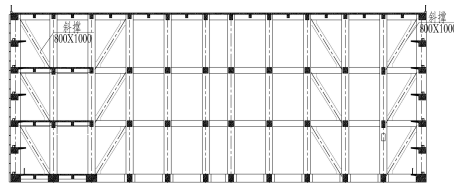


图6 优化方案断面图

4.2 优化前后应力及变形对比

为判断优化方案的合理性，对优化后码头进行计算，结果见图7。

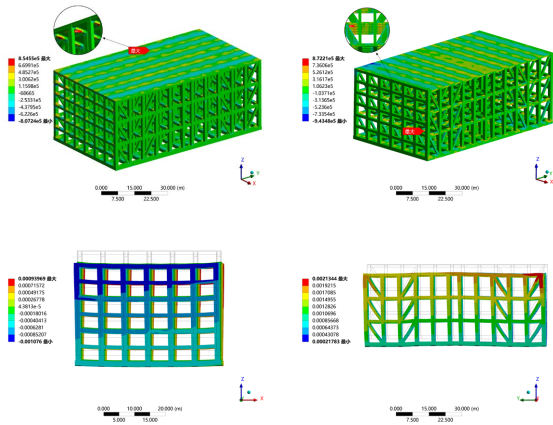


图7 优化方案应力及变形云图

比较原设计方案（四层）、优化过程1（三层）和优化过程2（增设竖向斜撑）中各个指标的变化，结果见表2。

表2 优化前后计算结果对比

结构形式	原设计方案	优化过程1	优化过程2
纵向最大拉应力/MPa	0.79	0.89	0.85
横向最大拉应力/MPa	0.99	1.07	0.87
码头纵向最大位移/mm	1.04	1.25	1.07
码头横向最大位移/mm	2.38	2.88	2.13

由表2可知：

（1）优化后框架结构在降低横向最大拉应力和位移方面效果显著，相较于优化过程1分别减少18.7%和26.1%，相较于原设计方案也分别减少12.1%和10.5%。对于一般的框架码头，沿水平荷载方向设置竖向斜撑能够有效减小最大拉应力，同时还能提高整体性，使码头抵抗变形的能力提升。

（2）未设置竖向斜撑之前，码头横向拉应力集中在水平荷载作用区域，而设置竖向斜撑后，由图7（b）可知码头横向拉应力分布更加均匀，并且较大的拉应力分布在横梁的底部，而不是梁柱交界位置，能够缓解框架结构在纵横撑及其连接处产生的应力集中现象。

4.3 优化前后经济性对比

仅从所需材料角度考虑，原设计方案主体框架结构需要混凝土14005 m³，优化方案需要混凝土12499 m³，减少了10.8%的混凝土用量。因此，通过减少框架层数并增设竖向斜撑优化框架码头能够提高其经济性。

5 结论

（1）对于高桩框架码头，其结构层数确定应兼顾工程量以及结构变形和应力分布情况，层数过少则结构

整体性较差，层数过多则梁柱交界处应力集中现象较明显，综合而言高桩框架码头层高在6~10 m为宜。

（2）码头上部宜直接作用在立柱上，若作用在梁或者面板上，可在下部框架结构增设“Z”字型竖向斜撑减小码头构件的应力。竖向斜撑的设置增加了结构的刚度，使框架码头的空间整体性增强，在减少层数的情况下，既能减小小应力和变形，也能减少工程量，使码头经济性更好、受力更优。

（3）框架码头设置竖向斜撑能够优化传力路径，使整体受力更加均匀，能够有效解决应力集中的问题。

参考文献：

- [1] 王多垠, 宋成涛, 温焰清等. 三峡库区变动回水区架空直立式码头结构形式研究[J]. 水运工程, 2011(03):54-58.
- [2] 周泽祥. 内河架空直立式码头结构的优化设计探讨[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(01):255-256.
- [3] 沈倩. 大水位差全直桩框架式高桩码头设计优化研究[D]. 南京: 河海大学, 2015.
- [4] 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, 31(02):132-137.
- [5] 高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1-2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [6] 王皓, 何嘉年, 黄镜儒等. 钢框架支撑结构体系试验研究综述[C]// 第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2016:628-638.
- [7] 王永. 双隅撑支撑钢框架结构抗震性能研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.

