

· 港口 ·



复杂荷载条件下 变刚度多层框架码头设计优化

王文华^{1,2}, 高加云^{1,2}, 许智鸿^{1,2}, 姜仁萍^{1,2}

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063;

2. 上海海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200063)

摘要: 以常德达门船舶有限公司吊机码头工程为例, 建立多个框架码头三维有限元模型, 在分析研究变刚度多层框架码头承受不同位置船舶水平撞击力下的变形特性的基础上, 通过对比有无竖向斜撑、水平斜撑等方案对码头整体变形的影响, 提出增加竖向斜撑而不增加水平斜撑的优化方案。该优化减少了复杂荷载条件下框架码头结构的变形, 在有限的工程投资下, 增加了结构的整体性, 提高了结构的可靠度。

关键词: 框架码头; 复杂荷载; 变刚度; 优化; 竖向斜撑; 水平斜撑

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0072-05

Structure optimization of variable stiffness frame wharf under complex load condition

WANG Wen-hua^{1,2}, GAO Jia-yun^{1,2}, XU Zhi-hong^{1,2}, JIANG Ren-ping^{1,2}

(1. CSSC China Shipbuilding NDR Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Research Centre of Ocean & Shipbuilding Maritime Engineering, Shanghai 200063, China)

Abstract: Taking Changde Damen crane wharf (a variable stiffness frame wharf) project for example, we establish several frame wharf three-dimensional finite element models. After analyzing and researching the deformation characteristics of variable stiffness frame wharves under different working conditions that ship percussive horizontal force is impacted at different water levels, we compare different overall deformations of frame wharves with or without vertical diagonal bracing and horizontal diagonal racing, and optimize the frame wharf structure by setting vertical diagonal bracings without setting horizontal diagonal racings. The optimized structure not only decrease the overall deformation of the frame wharf under the complex load condition, but also strengthen the frame wharf structural integrity and structural reliability with a reasonable cost.

Keywords: frame wharf; complex load condition; variable stiffness; structure optimization; vertical diagonal bracing; horizontal diagonal racing

高桩框架码头是高桩码头结构形式之一, 该结构形式能很好地适应大水位差、大水深的复杂水文条件以及陡岸坡、浅覆盖层等特殊地质环境。除了传统斜坡码头外, 直立式框架码头已成为近年来长江上游不少码头工程采用的结构形

式, 在我国西部地区、重庆、长沙等地的山区内河中已有较多实施完毕的直立式架空码头的工程案例。

西部交通科技项目、重庆市科技项目基于重庆寸滩集装箱港区项目, 对大水位差直立式码头

收稿日期: 2016-04-07

作者简介: 王文华 (1985—), 男, 工程师, 从事港口工程、水利工程及地下工程的设计工作。

设计进行了相关研究^[1-2], 但相关研究均基于排架刚度一致、荷载较为常规的条件。常德达门吊机码头在固定吊机下方为直径 4.1 m 的圆柱, 该码头结构在吊机基础处排架刚度变化明显, 同时, 该吊机码头兼作顶推试验平台使用, 空间受力较为复杂。本文以常德达门吊机码头工程为例, 通过有限元软件 ROBOT 进行计算, 定量分析有无竖向斜撑、水平斜撑对码头结构变形的影响, 从而优化码头结构。

1 工程概况

1.1 工程概况

常德达门吊机码头位于常德市沅水二桥东侧、沅江河北堤南侧, 码头岸线长 120 m, 码头共设 4 座工作平台, 其中码头江侧中部的平台一为吊机与船舶试验平台, 平台上设 120 t 固定式起重机, 前沿设计停靠 2 000 t 驳船, 该平台兼作为拖船水平顶推试验使用, 在固定吊机下方为直径 4.1 m 的圆柱。该吊机与船舶试验平台在吊机处排架刚度变化明显, 同时, 在本工程 4 个工作平台中是荷载最大、受力最为复杂的平台, 本文将重点分析该平台在不同工况组合下的受力特性及设计优化。

1.2 地质条件

工程所在区域地层自上而下分布情况为: ①层素填土、②层粉土、③层粉砂、④层圆砾。其中圆砾层工程性质较好、承载力较高、埋深较浅、特性较均匀, 为本工程区良好的桩基持力层。

1.3 设计水位

设计高水位为 42.5 m, 设计低水位为 29.0 m。

2 码头结构设计方案

码头面顶高程为 42.20 m, 码头前沿泥面高程为 23.00 m, 吊机与船舶试验平台的平面尺寸为 40 m×19.5 m, 共设 4 层, 4 层顶面的高程分别为 42.20、38.40、35.00 和 31.60 m。

吊机与船舶试验平台共包含 5 跨 7 榀排架, 横向排架间距均为 6 m, 每榀排架下一般设 4 根基

桩, 均采用钢筋混凝土钻孔灌注直桩, 在固定吊机处及靠海侧一排灌注桩直径为 1.2 m, 其余位置灌注桩直径为 1.5 m。顶层及底层平面如图 1 所示。

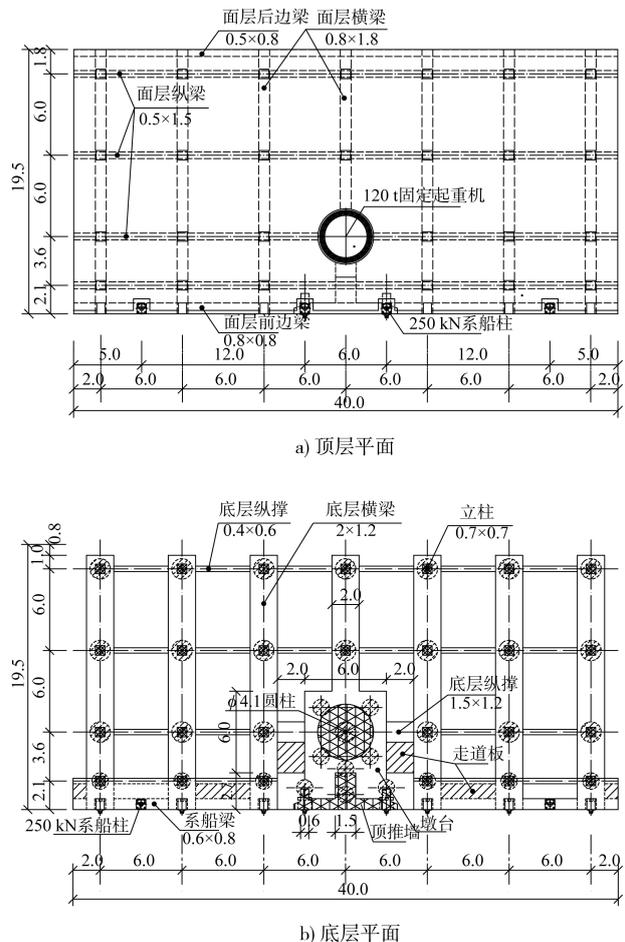
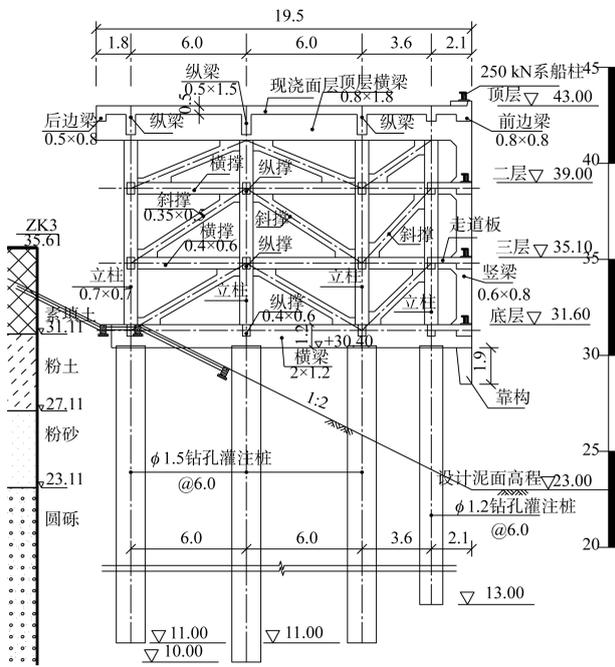
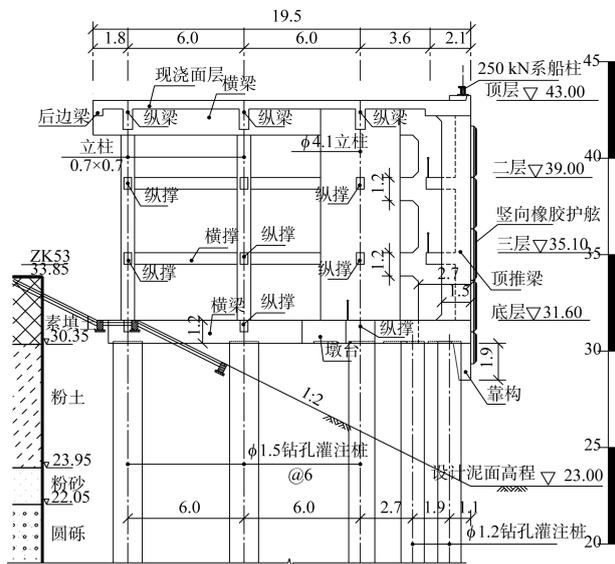


图 1 吊机与船舶试验平台 (单位: m。下同)

顶层为码头面层 (0.45 m 厚) 及纵横梁系 (横梁 0.8 m×1.8 m, 纵梁 0.5 m×1.5 m); 中间两层均为钢筋混凝土纵横撑 (0.4 m×0.6 m); 底层为现浇横梁 (2 m×1.2 m) 与纵撑 (0.4 m×0.6 m)。基桩与顶层纵横梁通过立柱 (0.7 m×0.7 m) 连接, 固定吊机基础下方另设直径 4.1 m 墩柱, 平台前沿顶推墙厚 0.8 m, 宽 7.6 m, 顶推墙与墩柱间另设支撑梁板若干, 码头前沿竖向设置的顶推墙 (0.6 m×1.5 m) 与竖梁 (0.6 m×0.8 m) 海侧设置橡胶护舷, 码头每层水平设置系船梁 (0.8 m×0.6 m), 隔跨设置 250 kN 系船柱。结构断面如图 2 所示。



a) 一般断面



b) 固定吊处断面

图2 吊机与船舶试验平台

3 有限元分析

3.1 三维有限元模型的建立

根据吊机与船舶试验平台框架结构刚度变化大及受力较复杂的特性，整体建立三维空间模型进行计算，采用通用有限元分析软件 ROBOT 进行计算，ROBOT 可以将每种荷载工况的标准值施加到模型中，计算每种工况下的作用效应值^[3]。

钻孔桩、立柱、纵横梁、边梁、顶推梁、纵横撑、斜撑、靠船构件均采用梁单元，面板、顶推梁之间的墙体采用壳单元。边界条件根据假想嵌固点的原理，考虑将桩底进行固结处理。吊机与船舶试验平台的三维有限元计算模型如图 3 所示。

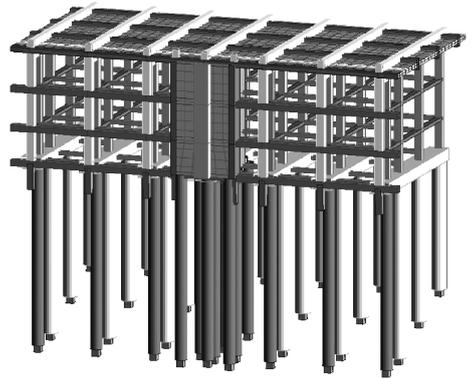


图3 三维有限元计算模型

3.2 现有结构受冲击力时的变形影响

与排架刚度一致的框架码头结构相比，吊机与船舶试验平台在固定吊机基础下是个直径 4.1 m 的钢筋混凝土圆形墩柱，该墩柱下部设置 6 m × 6 m × 1.2 m 的底板，底板下部桩基加密，因此，相比于其他排架 0.7 m × 0.7 m 的立柱，平台中部排架的刚度明显大于其他排架。随着洪枯水位的变化，船舶荷载的作用位置也不尽相同，为探究冲击力位置不同对变刚度框架码头的影响，在有限元分析时，仅考虑自重和冲击力作用，比较冲击力位置不同对平台整体变形的影响。

冲击力 710 kN/排架，只作用于 1 个排架，冲击力以节点荷载的形式施加，选择冲击力作用于最边跨排架或中部排架，最低水位时作用或最高水位时作用，4 种工况组合，高低水位冲击力作用点高程分别为 29.0 m 和 41.0 m。以 P_1 、 Z 表示排架 1、排架 4 在高、低水位时冲击力的作用工况，其中， P_1 表示最边跨排架 1， P_4 表示中部墩柱处排架 4， $Z_{高}$ 表示冲击力作用于最高 41.0 m 高程， $Z_{低}$ 表示冲击力作用于最低 29.0 m 高程。不同位置的冲击力与自重组合后的结果见表 1。

表 1 不同位置撞击力作用效应组合结果

作用排架	撞击力作用位置	作用高程/m	整体最大位移/mm	排架最大位移/mm	
				P_1	P_4
P_1	Z _高	41.0	6.4	6.0	3.5
P_1	Z _低	29.0	4.6	4.6	1.4
P_4	Z _高	41.0	2.2	2.1	1.7
P_4	Z _低	29.0	1.8	1.5	1.8

通过表 1 可知:

1) 当水平撞击力作用于同一榀排架时, 高水位的撞击力产生的平台位移较大; 而撞击力高程相同时, 作用于边跨 P_1 排架(边跨)产生的平台整体位移最大。说明高水位的撞击力在边跨 P_1 排架的工况为变形验算的控制工况;

2) 当水平撞击力作用于 P_1 排架(边跨)时, P_4 排架(中部墩柱处)最大位移仅为 P_1 排架位移的 58.3%; 而当撞击力作用于 P_4 排架时, P_4 排架位移与 P_1 排架位移接近。说明直径 4.1 m 的圆形墩柱处排架刚度较大, 在 P_1 排架受力条件下, 平台整体呈现出绕墩柱处为基点旋转的效应, 平面变形如图 4 所示。

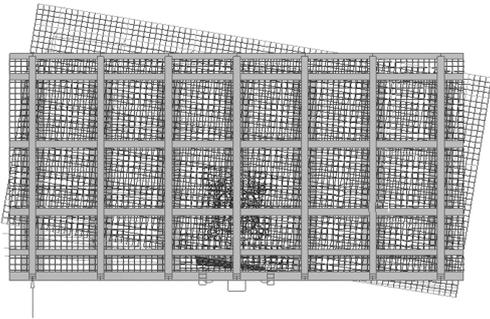


图 4 平面变形

根据上述分析认为, 该码头平台应增加边跨排架的刚度, 为协调整体变形, 一般考虑排架每层增设竖向斜撑、水平斜撑, 以缩小排架间的刚度差。

3.3 结构优化

为减少一般排架与中部墩柱处排架的刚度差, 考虑 2 种优化方案: 优化方案 1 为沿排架长度方向的立柱间设置对角“Z”字形竖向斜撑(0.35 m×0.5 m), 每榀排架每层增加 3 根, 7 榀排架共增加 60 根竖向斜撑; 优化方案 2 在方案 1 设置竖向斜撑的基础上, 中间每层的横撑和底层

横梁之间再增设对角“Z”字形水平斜撑(0.35 m×0.5 m), 共增加 60 根竖向斜撑和 54 根水平斜撑。优化方案 1 增加竖向斜撑后的码头断面见图 5, 优化方案 2 的三维有限元计算模型如图 6 所示。

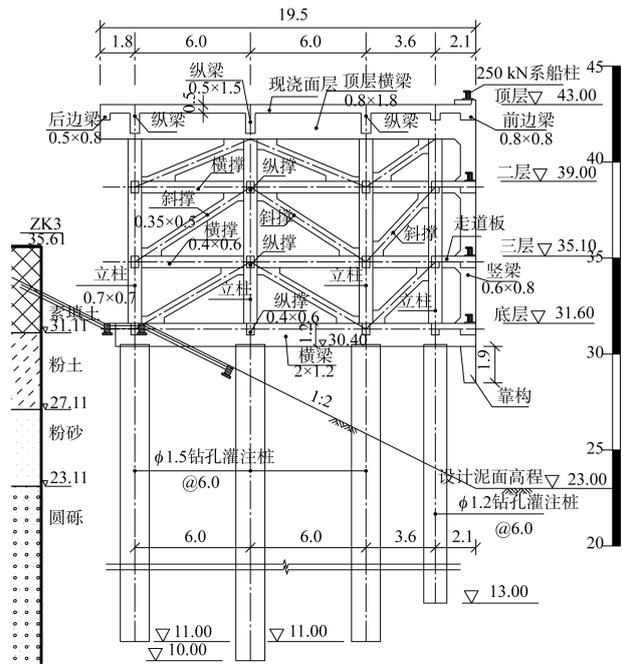


图 5 优化方案 1(增加竖向斜撑)断面

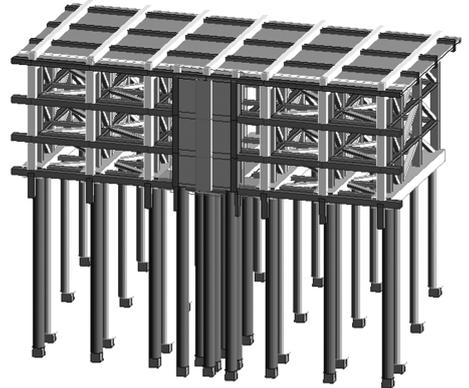


图 6 优化方案 2(增加竖向斜撑及水平斜撑)三维有限元计算模型

3.4 计算工况

3.4.1 永久荷载

结构自重, 有限元软件根据构建的截面尺寸及材料特性, 设置相应的参数自动施加, 另施加 120 t 固定吊机自重 1 200 kN。

3.4.2 可变荷载

1) 码头面均布荷载。

码头面前沿 1.8 m 范围内为 20 kPa, 其余范

围为 80 kPa, 根据实际情况考虑在码头面上满布、隔跨布置。

2) 流动机械荷载。

码头面行驶 120 t 模块运输车, 运输车质量 35 t, 满载质量 120 t, 采用有限元中专用的小车移动荷载来模拟, 考虑每次移动 1 m 在码头面按照行驶路径布置。

3) 吊机荷载。

码头面中心位置距离码头前沿 6 m 设置 120 t 固定式起重机, 吊机基础埋件为直径 3.8 m 的圆环, 垂直力 3 700 kN (其中自重 1 200 kN、吊重 2 500 kN), 倾覆力矩 25 000 kN·m, 水平力 180 kN, 吊机荷载以节点荷载的形式施加在吊机中心位置, 考虑吊机水平、倾覆力作用方向平行于岸线和垂直于岸线两种情况。

4) 船舶荷载。

①码头前沿每层平台均有 250 kN 系船柱, 考虑高水位顶层系船柱和低水位底层系船柱受力两种情况;

②撞击力 710 kN/排架, 只作用于 1 个排架, 撞击力以节点荷载的形式施加在橡胶护舷上。考虑高水位或低水位时最靠边排架或中间排架受撞击 4 种情况。

5) 顶推试验荷载。

①顶推力 700 kN, 荷载作用长度 1.50 m, 作用宽度 1.5 m, 考虑高水位或低水位时等效为均布荷载作用于顶推梁上的两种情况;

②顶推力 600 kN, 荷载为点接触, 考虑高水位或低水位时作用于顶推梁上的两种情况。

3.4.3 作用效应组合

根据可能出现的荷载组合情况, 将各种工况荷载作用标准值按照 JTS 167-1—2010 《高桩码头设计与施工规范》^[4]第 3.2 节的规定进行作用效应组合, 分析各构件可能出现的不同作用效应组合, 从中找出最不利的工况。永久荷载参与到每一种效应组合中, 可变荷载按照码头实际工况来进行组合分析。考虑到顶推试验时, 不允许船舶停靠

或接近平台, 且固定吊机此时不作业, 因此, 吊机荷载或船舶荷载不与顶推试验荷载同时出现在组合中。根据排列组合原则, 进行多个作用效应的组合。

3.5 优化前后的结构位移影响分析

为探明优化方案 1(加竖向斜撑)及优化方案 2(加水平斜撑及竖向斜撑)对结构位移的影响, 从而分析设置的合理性, 对两个方案分别建立了三维有限原模型, 比较位移的计算结果数值。不同优化方案的作用效应组合结果见表 2。

表 2 不同优化方案的作用效应组合结果

	码头结构	整体最大位移/mm	排架最大位移/mm	
			P_1	P_4
优化前	无斜撑	9.3	8.9	5.8
优化后	优化方案 1(加竖向斜撑)	4.9	4.7	3.5
	优化方案 2(加水平斜撑、竖向斜撑)	4.8	4.4	3.5

不同优化方案的工程量见表 3。

表 3 两种优化方案的斜撑增加工程量比较

优化方案	混凝土用量/m ³	钢筋用量/t
优化方案 1(加竖向斜撑)	63.45	7.61
优化方案 2(加水平斜撑、竖向斜撑)	131.23	16.64

1) 优化方案 1 增加竖向斜撑结构。从表 2 可知, 优化方案 1 的码头整体最大位移减小至优化前的 52.7%, 而边跨排架和中跨排架的最大位移差由之前的 34.8%减小至 25.5%。可见, 竖向斜撑在对边跨排架的刚度提升后, 有效地协调了码头整体变形, 并减少了不同刚度排架间的位移差距, 使框架码头的整体抗变形能力明显提升。

2) 优化方案 2 在增加竖向斜撑结构的同时还增加了每层排架之间的水平斜撑。从表 2 可知, 优化方案 2 的结构整体最大位移与方案 1 相当, 虽然位移略有减小, 但变化不明显; 从表 3 可知, 方案 2 斜撑增加的工程量是方案 1 的 206.8%。因此, 从经济上考虑方案 2 不如方案 1, 同时, 方案 2 对边坡疏浚的施工造成了一定的难度。