



多层靠船结构梁板式码头水平力简化分析

李华治, 杨 铎, 刘淑伟

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要: 为详细分析多层靠船结构梁板式码头在撞击力情况下码头排架的内力, 采用有限元建立 3D 及 2D 模型进行对比分析。研究发现采用《高桩码头设计与施工规范》中简化水平力方法计算的 2D 模型与 3D 模型计算结果有较大差异。提出采用弹性支座简化水平力的方法, 该方法能与 3D 模型计算结构较好吻合。

关键词: 多层靠船结构; 码头; 水平力; 弹性支座; Robot 结构分析

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0046-04

Simplified analysis of horizontal force in multi-layer beam slab wharf berthing structure

LI Hua-zhi, YANG Duo, LIU Shu-wei

(Anhui Provincial Communications Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: For a detailed analysis of the internal force of wharf bents of multi-layer beam slab wharf berthing structure under the ships' impact force, we use the 3D and 2D models to establish the finite element model for a comparative analysis. The result reveals that the calculation results of 2D model using the simplified method and that of 3D model have a great difference. This paper presents a method using the elastic supports' simplified horizontal force, which agrees well with the 3D model structure.

Keywords: multi-layer berthing structure; wharf; horizontal force; Robot structural analysis

桩基码头梁板式结构主要由下部桩基、上部纵横梁、柱和面板等构件组成。在桩基码头设计中, 结构分析是根据实际承受的水平荷载和竖向荷载, 将空间结构简化为板、弹性支座连续梁、平面排架和桩进行计算。在平面排架计算中, 对于排架间距相等且支撑点水平刚性系数相等、相近的码头, JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》给出了水平集中力的横向分力在排架中的分配系数表供设计人员使用^[1]。采用此方法计算简单适用, 但理论分析和试验分析表明, 简化计算与原型结构受力存在差异: 一方面使平面结构设计比较保守, 另一方面可能使整体结构的设计不尽合理, 从而带来一些结构安全方面的隐

患^[2]。此差异在多层靠船结构梁板式码头中尤为突出。

本文以铜陵港某码头分别用 2D 和 3D 两种模型进行计算, 对结果进行比较, 分析不同模型结构内力差异产生的原因, 并提出在 2D 模型中采用弹性支座简化水平力的方法。

1 工程概况

铜陵港某码头平台面高程 13.8 m, 防洪水位为 14.78 m, 设计高水位为 13.65 m, 设计低水位为 1.32 m, 码头前沿河底高程 -7.5 m。取码头标准结构段分析, 结构段长 67.5 m, 平台宽 18.5 m, 排架间距 8 m, 共 8 个排架, 桩端持力层为密实粉

收稿日期: 2015-02-06

作者简介: 李华治 (1977—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计工作。

细砂层。PHC 直桩外径 1 000 mm, 壁厚 130 mm; 钢管桩外径 1 000 mm, 厚 18 mm。横梁截面尺寸 2.8 m×1.0 m, 轨道梁 1.9 m×0.6 m, 纵梁 1.9 m×0.5 m, 前边梁 1.1 m×1.1 m, 后边梁 1.9 m×0.4 m, 面板厚 0.4 m。平台横断面见图 1, 结构段桩位见图 2。

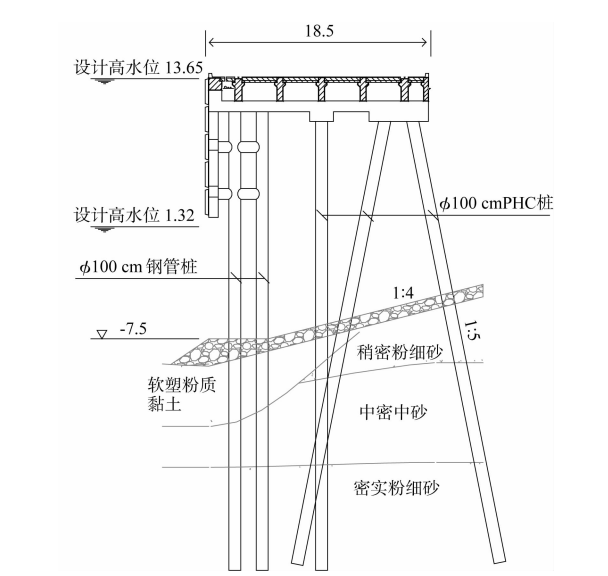


图 1 平台断面 (单位: m, 下同)

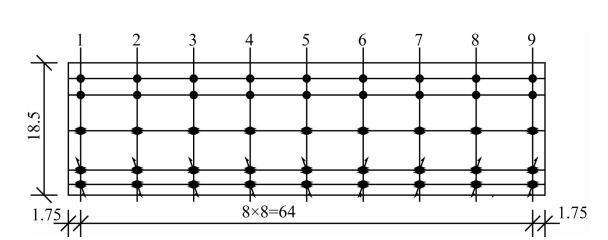


图 2 平台结构段桩位

2 有限元模型

结构分析采用 Autodesk Robot Structural Analysis 有限元结构分析软件, Robot Structural Analysis 是通用线性静态分析工具。

2.1 计算参数

码头钢筋混凝土结构和钢管桩采用线弹性本构模型, 各结构质量密度、弹性模量和泊松比见表 1^[1]。

表 1 材料物理参数				
部位	材料	质量密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比
钢管桩	Q235	7.701	206 000	0.3
PHC 桩	C80	2.500	38 000	0.2
梁、板	C30	2.500	30 000	0.2

2.2 边界条件

本模型选取高桩码头前方桩台的一个标准结构段作为研究对象, 对边界条件进行了简化: 1) 模型不考虑结构段之间的相互作用、码头平台与引桥间的相互作用; 2) 钢管桩和 PHC 桩桩顶与横梁固结, 桩底端按弹性嵌固点法考虑, 嵌固点深度采用 m 法计算。各排桩嵌固点深度根据边坡的情况计算确定^[3]。

模型的整体坐标为笛卡尔坐标, 原点取在平台端下方高程为零处, X 轴平行于码头前沿, 指向上游侧为正, Y 轴为垂直码头前沿, 指向岸侧为正, Z 轴垂直于码头面, 指向天空为正。

2.3 计算单元

本研究主要以桩和框架内力为目的, 因此码头按考虑面板的模型进行分析。码头面板采用薄壳单元; 纵梁、横梁采用梁单元; 桩采用柱单元; 由于桩顶在横梁底面处连接, 桩顶与横梁中性轴有高差, 同时桩身与横梁衔接为固结形式, 因此桩基与横梁的连接采用刚性单元。纵横梁中性轴的高差通过截面偏置模拟纵梁和横梁的实际相对位置^[1-2, 4, 12]。

2.4 分析工况

可变作用为船舶撞击力, 按现行规范计算, 1 万吨级船舶靠泊时有效撞击能量为 $E_0 = 110.25 \text{ kJ}$, 选用的 SA-A500 型橡胶护舷, 船舶撞击力取 $F = 500 \text{ kN}$ ^[5]。平面计算时撞击力的分配系数与数值见表 2^[1], 排架编号见图 2, 考虑排架的对称性仅列出 1[#]~5[#]排架。

表 2 撞击力分配		
排架	分配系数	撞击力/kN
1 [#]	0.379	189.50
2 [#]	0.311	155.50
3 [#]	0.244	122.00
4 [#]	0.177	88.50
5 [#]	0.111	55.50

排架内力不但与撞击力大小有关, 而且和撞击点高程相关^[6], 因此撞击点高程分别选择 11.0、8.6、4.7 m 高程进行分析 (图 3)。

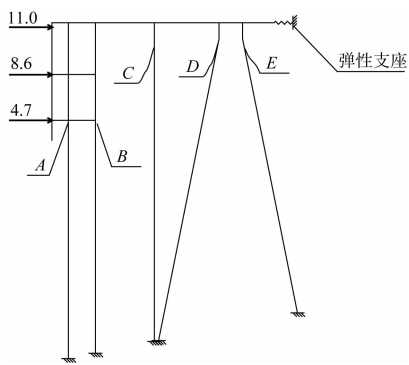


图3 平台计算简图

共采用3种不同的工况对结构进行分析：工况1撞击力高程位于11.0 m，3D模型中撞击力分别位于1#~5#排架，撞击力为500 kN，2D模型中撞击力大小按表2中分配后撞击力大小取值。工

况2选取1#排架，撞击力高程分别为11.0、8.6、4.7 m，3D模型中撞击力位于1#排架，撞击力为500 kN，2D模型中撞击力按表2取189.5 kN。工况3选取1#排架进行分析，撞击力高程分别为11.0、8.6、4.7 m，3D模型中撞击力位于1#排架，撞击力为500 kN，2D模型中考虑在横梁后沿增加弹性支座，模拟相邻排架对计算排架的作用，因此撞击力不折减，取500 kN。

3 计算结果分析

3.1 不同撞击排架的结构内力差异

通过工况1来研究结构采用3D模型与2D模型在不同排架的结构内力的差异，分析结果见表3。

表3 不同排架3D与2D模型结构内力对比

排架	模型	轴力/kN					弯矩/(kN·m)					横梁Y向 位移/mm
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
1#	3D	-53.42	33.25	-17.58	-372.05	309.28	-69.65	-72.74	-51.30	-49.86	-75.90	1.9
	2D	-37.51	9.83	34.17	-339.92	334.62	-29.30	-34.44	-41.66	-59.71	-87.69	1.6
2#	3D	35.76	16.97	-22.79	-240.42	200.27	-47.92	-49.69	-33.72	-31.34	-47.99	1.5
	2D	4.10	11.80	4.61	-281.98	261.98	-37.32	-40.32	-33.43	-45.87	-67.95	1.3
3#	3D	1.43	8.95	-2.63	-165.55	162.11	-27.77	-30.31	-25.99	-23.20	-35.23	1.1
	2D	3.21	9.26	3.62	-221.23	205.54	-29.28	-31.63	-26.23	-35.98	-53.31	1.0
4#	3D	-9.08	1.75	0.66	-100.94	115.27	-17.18	-19.18	-18.33	-15.14	-22.98	0.8
	2D	2.33	6.72	2.62	-160.48	149.10	-21.24	-22.95	-19.03	-26.10	-38.67	0.7
5#	3D	-7.16	0.32	0.33	-47.31	58.18	-10.74	-12.05	-11.67	-7.30	-11.51	0.4
	2D	1.45	4.18	1.63	-99.74	92.66	-13.20	-14.26	-11.83	-16.22	-24.03	0.5

从表3中可以看出：水平力作用下A、B、C三处桩的内力绝对值小，相比结构自重、设备荷载产生的内力值远小，因此内力差异对结构的影响不大，仅对D、E两处的桩身内力进行分析。

以3D模型内力为基数，按2D、3D模型内力差值占用基数的比例分析，桩内力差异与排架的关系见图4。

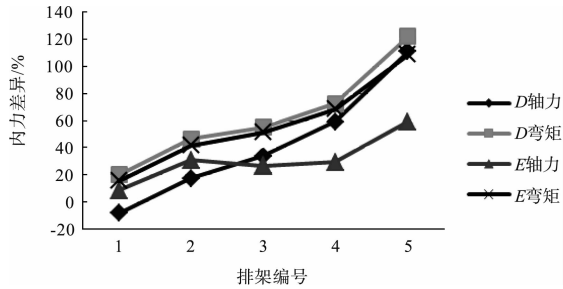


图4 桩内力差异与排架关系

D、E两处桩的轴力差异最大为111%，平均值为38%；弯矩差异最大为120%，平均值为61%。从1#到5#排架差异逐渐增加，表明当撞击力从结构段端部到中部变化时，规范对应的分配系数较3D模型分析水平力影响系数大^[6]。考虑内力差异大部分为正偏差，而且1#排架内力绝对值较大，在荷载组合中起控制作用，其2D、3D模型最大差异为20%，差异很小。故采用《高桩码头设计与施工规范》简化水平力横向分力应是安全的，也较为经济合理^[7]。

3.2 不同撞击高度的结构内力差异

通过工况2来研究结构采用3D模型与2D模型在不同撞击高度的结构内力的差异，结果见表4。

表 4 不同高度 3D 模型与 2D 模型结构内力对比

高程/m	模型	轴力/kN					弯矩/(kN·m)					横梁 Y 向 位移/mm
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
11.0	3D	53.42	33.25	-17.58	-372.05	309.28	-69.65	-72.74	-51.30	-49.86	-75.90	1.9
	2D	4.99	14.38	5.62	-343.64	319.27	-45.48	-49.13	-40.74	-55.89	-82.80	1.6
8.6	3D	130.32	40.27	-55.83	-392.25	274.29	-118.07	-121.80	-51.86	-45.77	-71.52	1.8
	2D	47.57	17.71	-20.62	-343.83	299.19	-68.51	-72.05	-39.70	-51.58	-77.14	1.5
4.7	3D	232.22	4.23	-82.38	-398.15	222.94	-243.79	-264.43	-51.59	-40.42	-64.97	1.7
	2D	105.09	3.55	-44.39	-329.53	262.58	-122.33	-131.79	-37.33	-44.85	-67.88	1.4

从表 4 可知：D、E 两处桩不同高度水平力作用下的内力均相差不大，最大差异为 E 处撞击力 4.7 m 高程处的轴力差异 18%。C 处桩的内力绝对值小，因此仅对 A、B 两处的桩身内力进行分析。桩内力差异与撞击高度的关系见图 5。

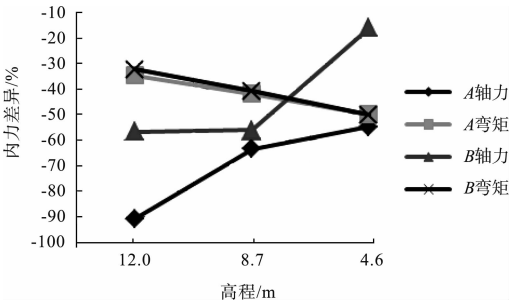


图 5 桩内力差异与撞击高度关系

从图 5 中可以看出：A、B 两处桩的轴力差异最大为 -91%，平均值为 -56.5%，弯矩差异最大为 -50%，平均值为 -40%。因码头前沿 A、B 处结构类似于框架结构，其桩轴力差异应变化趋势相近随着撞击点高度的降低而减少^[8]，上述分析成果也符合此规律；而 A、B 两处桩弯矩的差异随着撞击点高度的降低而增大。总体来看，2D 模型轴力及内力差异均为负偏差，即 2D 模型较 3D 模

型分析内力小，因此按规范简化水平力方法进行 2D 模型分析对于 A、B 处桩是偏于危险的。

分析内力随撞击高度降低的原因，主要在于 2D 模型直接对水平力进行了折减，虽然在对码头叉桩处内力差异较小，但在前沿与靠船构件直接连接的桩基内力相差较大。

3.3 采用弹性支座简化水平力分配

通过 3D 模型及实验分析，整个码头排架在纵向可视作弹性支承的连续刚性梁。在水平力作用时，码头产生刚体运动，相邻排架对计算排架的约束类似于弹性约束^[9]。为了使 2D 模型符合码头的真实排架工作状态，本文提出采用弹性支座来模拟相邻排架对计算排架的约束，简化方法如下：

约定计算排架的水平刚性系数为 K_1 ，规范中排架折减系数为 α ，弹性支座的刚性系数 K_2 采用下式计算：

$$K_2 = \frac{K_1}{\alpha} (1 - \alpha)$$

(1)

由此得出，计算的撞击力位于 1# 排架时，弹性支座的刚性系数 K_2 为 195 062 kN/m。考虑相邻排架对计算排架的约束主要在于上部纵梁面板，因此弹性支座作用在横梁端部。工况 3 计算结果见表 5。

表 5 不同高度 3D 与 2D 弹性支撑模型结构内力对比

高程/m	模型	轴力/kN					弯矩/(kN·m)					横梁 Y 向 位移/mm
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
11.0	3D	53.42	33.25	-17.58	-372.05	309.28	-69.65	-72.74	-51.30	-49.86	-75.90	1.9
	2D	45.98	28.28	7.25	-372.61	290.46	-61.9	-64.47	-42.68	-62.47	-97.45	1.6
8.6	3D	130.32	40.27	-55.83	-392.25	274.29	-118.07	-121.80	-51.86	-45.77	-71.52	1.8
	2D	157.25	37.38	-61.74	-390.67	255.61	-124.58	-127.08	-42.04	-53.87	-86.49	1.5
4.7	3D	232.22	4.23	-82.38	-398.15	222.94	-243.79	-264.43	-51.59	-40.42	-64.97	1.7
	2D	306.43	6.06	-123.85	-395.02	202.52	-271.15	-289.83	-40.92	-42.81	-71.60	1.4