



高桩码头端部排架桩基布置

刘二利¹, 赵敏²

(1. 宁波大榭招商国际码头有限公司, 浙江 宁波 315812;
2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 高桩码头横向排架内力通常简化为平面结构进行计算, 但码头端部的排架作为艏艉缆绳的受力排架或受制于相邻结构的影响, 其桩基布置往往不同于其他排架, 平面计算并不能准确反映端部排架的受力和变形。结合鱼山出灰码头桩基布置设计实例, 采用平面计算法和空间计算法对水平荷载作用下码头结构分段端部排架不同桩基布置方案进行对比分析, 得出不同计算方法及不同桩基布置下各排架桩基内力和变形计算结果的差异。结果表明, 对于对称性水平荷载, 平面计算的桩基轴力结果与码头结构分段端部自由的端部排架桩基轴力结果基本相当; 对于非对称性水平荷载, 平面计算的桩基轴力结果普遍大于空间计算的结果; 端部排架布置双排桩加强后, 码头结构的位移会有一定程度减小。

关键词: 高桩码头; 端部排架; 桩基设计; 空间计算

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0116-07

Pile foundation layout of end bent for piled wharf

LIU Er-li¹, ZHAO Min²

(1. China Merchants International Container Terminals Ningbo, Daxie Co., Ltd., Ningbo 315812, China;
2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The internal force of piled wharf transverse bent is usually simplified as a plane structure to calculate, but the end bent of the wharf as the stressed bent of the bow and stern cables, is affected by the adjacent structures. The pile foundation layout of end bent is different from other bents, and the simplified plane calculation cannot accurately reflect the force and deformation of the end bent. Based on the example of pile foundation layout design of Yushan ash loading wharf, we use the plane calculation method and space calculation method to compare and analyze different pile foundation layout schemes of the end bent of wharf structure under horizontal load, and obtain the differences of calculation results of internal force and deformation of each pile foundation under different calculation methods and pile foundation layout schemes. The results show that for the symmetric horizontal load, the axial force of pile foundation calculated by the plane calculation method is equivalent to that of pile foundation of end bent with the free end of wharf structure. For the asymmetric horizontal load, the axial force of pile foundation calculated by the plane calculation method is generally larger than that calculated by the space calculation method. The displacement of the wharf structure is reduced to a certain extent after the end bent is strengthened with double row piles.

Keywords: piled wharf; end bent; pile foundation design; space structure calculation

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 刘二利(1978—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程建设项目管理。

通讯作者: 赵敏(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程建设。E-mail: zhaomindlut@163.com。

常规的高桩码头计算方法是 将码头结构简化成横向排架进行平面计算^[1]，现行的《码头结构设计规范》^[2]也明确说明，当桩基沿横梁布置、各排架间距均匀、桩基布置相近时，纵梁及横向排架内力可简化为平面结构计算。但简化为平面计算忽略了码头不同排架空间位置及内力分布的相互影响，平面计算结果与码头不同位置排架实际受力存在一定差异^[3-5]。工程上通常采用对应端部排架的横向分配系数去确定水平荷载并施加在计算排架上，以保证码头结构各排架均能满足承载力要求，这对于中间排架是一种相对保守的计算方法。但平面计算在码头结构变形计算时具有较大的局限性，平面计算无法反映空间结构在不同受力条件下的偏转特性，端部排架由于一侧无结构约束，在承受水平荷载作用时其结构位移要远大于中间排架，因此采用平面计算时往往不能反映端部排架的实际位移。

另外，码头结构分段的端部排架往往为直接带缆受力排架，或是受相邻结构分段或其他构筑物的影响，其桩基布置往往不同于其他排架。但常规平面计算常忽略这些差异，默认端部排架桩基布置差异影响较小，仍然取一般排架的平面计算结果作为最终计算结果。这种忽略在一定程度上存在安全风险，端部排架桩基布置的差异会引起排架内力分布及结构位移的变化。对于运营作业期间对码头结构位移敏感，须严格控制位移量的码头来说，应注重对码头结构端部排架的桩基设计并采用空间计算方法对码头结构位移进行计算，以保证满足安全使用要求。

本文结合鱼山出灰码头桩基布置设计实例，除采用常规平面计算外，另外采用 ROBOT 有限元软件对码头端部排架桩基布置形式进行空间计算，以对比分析端部排架不同桩基布置对码头结构桩基内力及位移的影响，研究成果对码头工程桩基布置设计具有一定的参考意义。

1 工程概况

鱼山出灰码头位于鱼山作业区北部岸线东侧，主要为后方热电厂提供配套服务，主要货种为飞灰，码头设计吞吐量为 79.7 万 t/a。飞灰从后方灰库采用气力输送至出灰码头进行装船作业。出灰码头布置 1 个 3 000 吨级泊位，码头长度可同时靠泊 2 艘 2 000 吨级船舶，码头总长 255 m，宽 20 m。码头顶面高程 9.6 m，前沿设计泥面高程 -7.5 m。

码头平台上设置 8 套干灰装船系统，每套装船能力 200 t/h。装船系统包括钢结构缓冲仓、装船摆臂、空气斜槽及除尘系统，见图 1。在缓冲仓顶设灰气分离装置，后方物料经灰气分离落入仓内，仓底设给料机，干灰从仓底卸料经空气斜槽通过伸缩溜管进行装船。飞灰的水平运输采用气力输送，从后方灰库经气力输送管输送至码头缓冲仓，经仓顶的灰气分离装置进入缓冲仓。气力输送管道为压力管道，沿码头后沿铺设，对结构位移较为敏感，为保证气力输送管道安全使用，须严格控制码头结构位移。

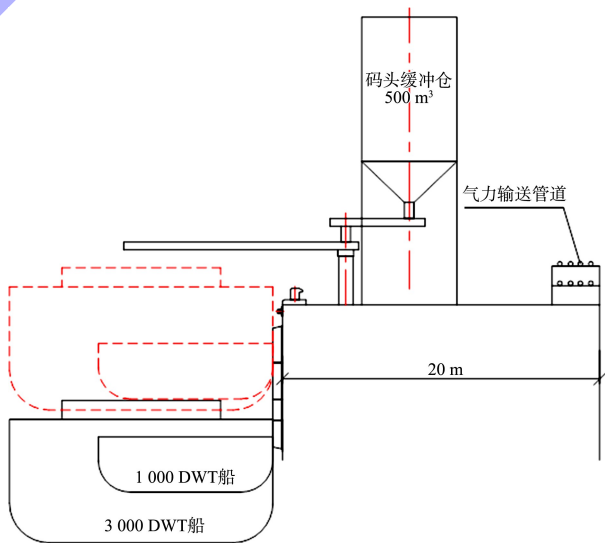


图 1 出灰码头工艺断面

2 设计条件

2.1 水文条件

本工程设计波浪见表 1，设计流速为 1.2 m/s。

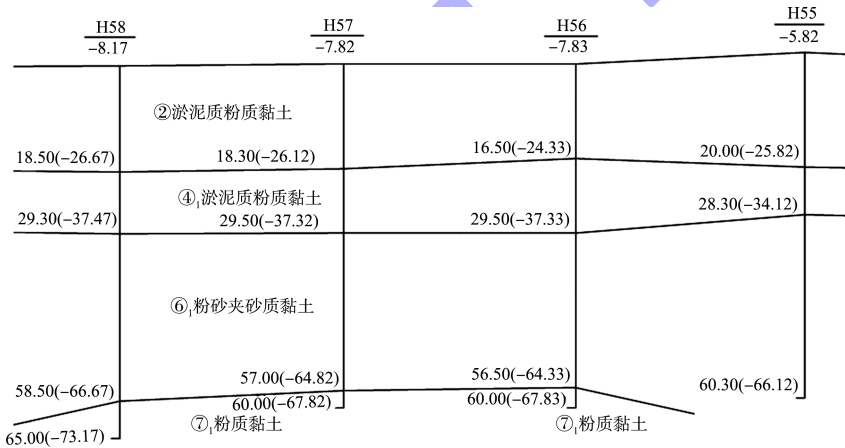
表 1 本工程 50 a 一遇设计波要素

波向	水位	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{4\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	周期 T/s	波长 L/m	波速 $c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	水深 d/m
N~NE	极端高水位	6.89	5.92	5.75	4.89	8.1	90.5	11.2	20.1
	设计高水位	6.67	5.75	5.58	4.75	8.1	89.1	11.0	18.9
	设计低水位	5.96	5.16	5.01	4.29	8.1	83.0	10.2	14.9
	极端低水位	5.69	4.93	4.79	4.10	8.1	81.3	10.0	14.0
E	极端高水位	5.31	4.54	4.39	3.71	11.6	146.4	12.6	20.1
	设计高水位	5.09	4.35	4.21	3.56	11.6	142.9	12.3	18.9
	设计低水位	4.41	3.78	3.66	3.10	11.6	129.7	11.2	14.9
	极端低水位	4.22	3.62	3.51	2.97	11.6	126.3	10.9	14.0

2.2 地质条件

根据地质资料，勘探深度范围内的土层自上而下为②淤泥质粉质黏土、③₁粉砂、③_{1a}淤泥质粉质黏土、③₂淤泥质粉质黏土、④₁淤泥质粉质黏土、⑤₁粉质黏土、⑤₂黏质粉土夹粉砂、⑥₁粉

砂夹砂质粉土、⑥₃圆砾、⑦₁粉质黏土、⑩₂强风化基岩、⑩₃中风化基岩。出灰码头地质钻孔剖面见图 2，可以看出，码头区域软土覆盖层深厚，码头结构适合采用桩基础。



注：括号外数字为深度；括号内数字为高程。

图 2 地质剖面 (单位: m)

2.3 荷载条件

1)恒载: 结构自身重力; 2)均布荷载: 20 kN/m²; 3)筒仓立柱荷载; 4)流动机械荷载: 40 t 平板车、总质量 30 t 汽车、120 t 汽车吊所产生的重力; 5)船舶荷载: 按《港口工程荷载规范》^[6]有关条款计算船舶撞击力、系缆力和挤靠力等船舶荷载; 6)波浪力、水流力: 按《港口与航道水文规范》^[7]有关条款计算。

3 码头结构方案

码头采用现浇横梁结构形式，码头上部结构

采用现浇横梁、预制纵向梁、预制面板和现浇面板的叠合构件，见图 3。排架间距 8 m，桩基采用 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 钢管桩，每榀排架布置 6 根桩基。护舷选用 500H 拱型橡胶护舷(标准反力型)，系船设施选用 650 kN 系船柱。码头设置下层带缆平台，同样布置 650 kN 系船柱。

码头设 4 个结构分段，其中最西端结构分段长约 70 m，共设 9 个排架，本文即以此结构分段进行建模计算分析。

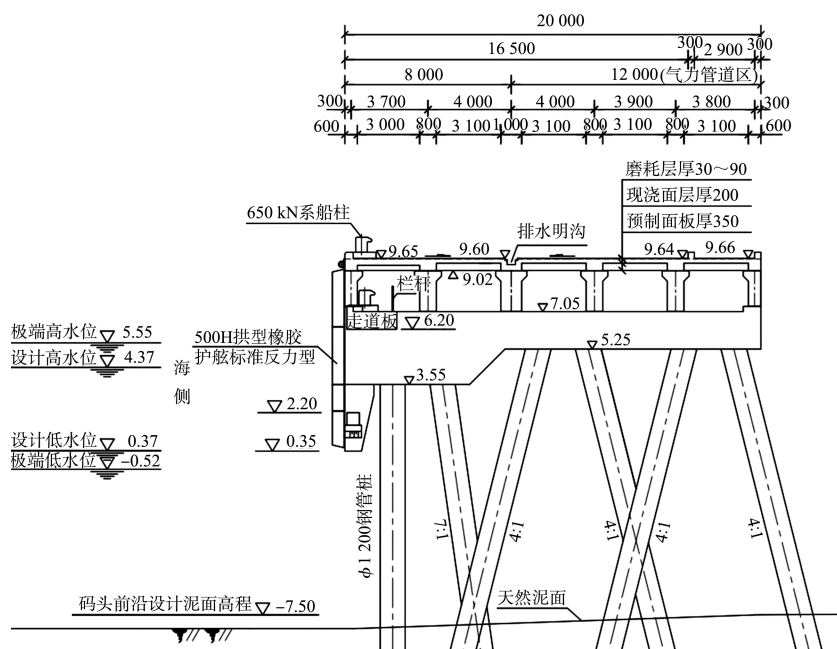


图3 出灰码头断面 (尺寸: mm; 高程: m)

4 桩基布置计算分析

4.1 计算方法

为研究码头端部排架不同桩基布置对码头结构桩基内力及位移的影响,分别采用平面方法和空间方法进行计算。由于端部排架内力及位移主要受水平荷载影响,因此计算分析主要考虑船舶系缆力、靠岸撞击力和横摇撞击力等主要水平荷载,其中船舶系缆力和靠岸撞击力仅作用于端部排架,而横摇撞击力作用于结构分段每个排架。

4.1.1 平面计算

平面计算采用易工高桩梁板式码头设计软件进行计算, 见图 4。该软件是将码头结构简化为平面刚架进行计算, 桩顶与横梁形心采用刚性连接。桩底采用假想嵌固点法。水平荷载采用横向分配系数施加于计算排架上。

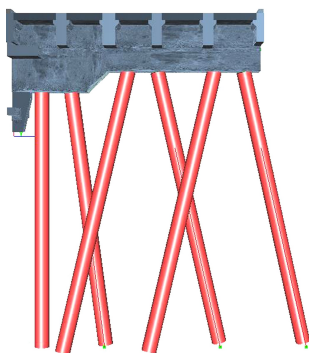


图 4 平面计算模型

4.1.2 空间计算

空间计算采用 ROBOT 有限元软件进行计算, 见图 5, 以出灰码头端部结构分段进行整体建模, 其中码头桩基及梁系采用杆单元, 码头面板采用板壳单元。模型结构分段西端为自由端, 东端设置水平弹簧约束以考虑相邻结构分段约束影响。桩底在假想嵌固点位置设置固定约束(仅轴向设置弹性系数), 水平荷载根据不同作用位置以点荷载形式施加于相应位置。

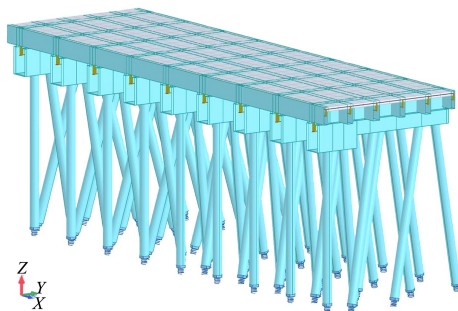


图 5 空间计算模型

4.2 计算工况

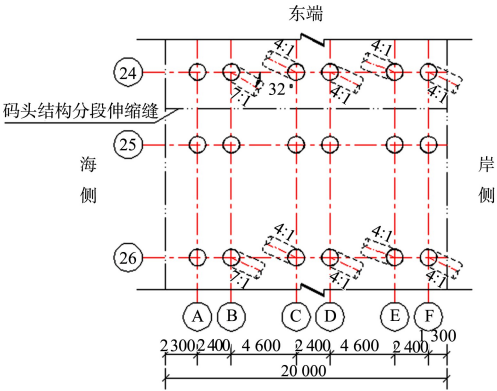
根据实际高桩码头工程设计时端部排架桩基布置的几种常见情况,空间计算时对应考虑以下3种计算工况:

1) 工况 1。端部排架桩基布置与中间排架相

同，这种布置形式在实际工程设计中最为常见。具体桩位布置见图 6a)。

2) 工况 2。端部横梁进行加强，沿横梁布置 2 排桩基，每排布置 6 根桩，共 12 根桩。对于码头水深较大、位移控制要求较高的码头，常采用这种布置形式，以限制码头端部位移。具体桩位布置见图 6b)。

3) 工况 3。码头结构分段间常采用悬臂结构，并设凹凸伸缩缝对接。结构分段悬臂结构长度一般为 3 m 左右，端部排架桩基布置空间有限，为方便打桩船沉桩施工并避免碰桩，相邻分段端部排架一般都不不同于中间排架。另外，对于码头接长等扩建或改建工程，受已有构筑物影响，打桩船位置受限，新建结构分段端部排架往往只能布置直桩。为分析端部排架斜桩变直桩影响，工况 3 在工况 1 的基础上将结构分段东端排架桩基全部改为直桩，具体桩位见图 6c)。



c) 工况3(全直桩)

注：B、C、D、F 轴的桩基扭角均为 25°，E 轴的桩基扭角为 20°。

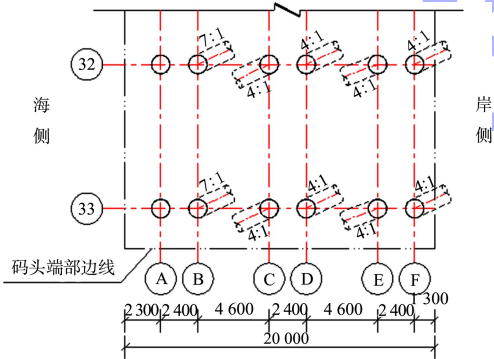
图 6 不同计算工况桩基布置 (尺寸: mm)

4.3 计算结果

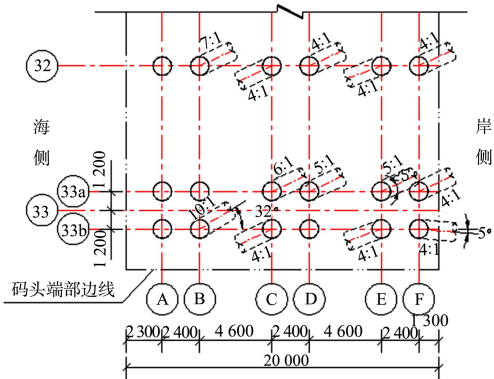
为更直观比较码头端部排架不同桩基布置对码头结构桩基内力及位移的影响，选取船舶系缆力、靠岸撞击力和横摇撞击力各单荷载作用时，不同计算工况下桩基最大轴力和位移结果进行对比，见表 2。

4.3.1 桩基轴力计算结果分析

根据平面计算及空间计算的 3 种工况计算结果对比可知，对于横摇撞击力这种对称性水平荷载，平面计算的桩基轴力结果与码头结构分段端部自由的端部排架桩基轴力结果基本相当，但大于中间排架及端部存在约束的端部排架桩基轴力结果；对于系缆力和靠岸撞击力的非对称性水平荷载，平面计算的桩基轴力结果普遍大于空间计算的结果。由于高桩码头是一个空间整体结构，纵梁和面板等其他构件的刚度对码头结构整体内力分配的影响不可忽略^[8]，将其简化为平面结构计算，不考虑各排架间的相互作用，会使计算结果与结构实际受力产生偏差。一般来说，忽略纵梁和面板刚度影响而采用横向分配系数来考虑水平荷载分配的平面计算结果偏于保守，因此工程上及规范均认可采用平面方法进行简化计算。



a) 工况1(单排桩)



b) 工况2(双排桩)

表 2 不同工况下计算结果对比

计算结果		西端排架(自由)											
		系缆力(作用于西端排架)				靠岸撞击力(作用于西端排架)				横摇撞击力(作用于全部排架)			
		最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm	最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm	最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm
平面		204	-188	-1.71	-	289	-357	2.89	-	397	-460	3.82	-
空间	工况 1	73	-208	-12	-21	206	-224	9	5	432	-383	14	5
	工况 2	186	-475	-11	-17	252	-206	9	4	317	-266	11	4
	工况 3	66	-201	-12	-21	207	-224	9	5	419	-368	14	6

计算结果		中间排架											
		系缆力(作用于西端排架)				靠岸撞击力(作用于西端排架)				横摇撞击力(作用于全部排架)			
		最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm	最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm	最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm
平面		204	-188	-1.71	-	289	-357	2.89	-	397	-460	3.82	-
空间	工况 1	162	-177	-3	-21	81	-45	3	5	280	-243	10	5
	工况 2	141	-159	-2	-16	29	-15	2	4	300	-263	10	4
	工况 3	163	-175	-4	-21	81	-45	3	5	280	-243	10	6

计算结果		东端排架(存在水平约束)											
		系缆力(作用于西端排架)				靠岸撞击力(作用于西端排架)				横摇撞击力(作用于全部排架)			
		最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm	最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm	最大轴力/kN	最小轴力/kN	横向位移/mm	纵向位移/mm
平面		204	-188	-1.71	-	289	-357	2.89	-	397	-460	3.82	-
空间	工况 1	165	-98	5	-21	86	-143	5	-3	191	-237	5	5
	工况 2	141	-84	3	-16	100	-152	5	-2	171	-219	5	4
	工况 3	54	-25	4	-21	26	-27	5	-2	12	-29	6	6

对比 3 种不同端部排架桩基布置工况的空间计算结果可知，工况 2 对端部排架布置双排桩加强后，不同位置排架承受不同荷载的桩基轴力有增有减。西端端部排架虽然单根桩轴力增加并不明显，但是由于桩基数量增加，其抗水平力刚度相应增加，该排架在水平荷载分配时承担了更多的水平荷载。工况 3 将与其他结构分段相邻的东端端部排架桩基斜桩改成直桩后，结构分段其他排架的桩基轴力变化很小，东端端部排架由于其直桩基本不参与水平荷载的分配，因此该排架桩基轴力会显著降低，其水平荷载将由相邻排架和相邻结构分段承担。

4.3.2 桩基位移计算结果分析

对比平面计算及空间计算 3 种工况的位移结果可知，各荷载作用下的平面计算位移结果相比空间计算结果均很小，且无法计算纵向位移。这是由于平面计算假设排架的变形仅发生在排架的平面范围内，且仅考虑排架平面内的受力，不考虑垂直于排架方向的码头纵向受力，因此忽略了码头纵向的受力与变形。但是从空间计算位移结

果，平面计算对纵向位移的忽略既不合理也不安全。由于系缆力与码头前沿线存在一定夹角，存在沿码头方向的纵向分力，而码头排架桩基布置基本以抵抗垂直码头方向水平荷载为主，因此在系缆力作用时会产生一定的纵向位移，当该位移量大于结构分段的伸缩缝宽度时，相邻结构分段会提供一定的约束反力以限制该位移。但是建议每个结构分段设置纵向叉桩抵抗纵向水平力以减小纵向位移。

从空间计算 3 种工况的位移结果可知，在承受非对称性水平荷载时，码头结构会发生偏转，空间计算位移结果要远大于平面计算位移结果。典型位移计算结果见图 7。工况 2 对端部排架布置双排桩加强后，不同位置排架的位移均有一定程度的减小，虽然位移减小的绝对值不大，但是减小比例并不低。工况 3 将与其他结构分段相邻的东端端部排架桩基斜桩改成直桩后，由于有相邻结构分段的水平约束，工况 3 各排架的位移计算结果与工况 1 基本相当。因此，从桩力计算结果和位移计算结果来看，在有相邻结构提供可靠的水平约束时，端部排架桩基布置斜桩改成直桩，

在承受水平荷载时影响不大。

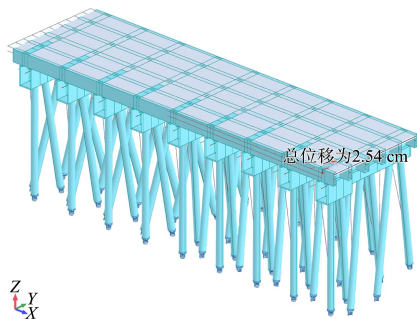


图 7 工况 1 系缆力作用下位移结果

本工程泊位等级较小，船舶荷载相对较小，因此工况 2 显示西端端部排架加强后在单荷载作用下其位移的改善效果并不明显。但考虑到出灰码头气力输灰管道对位移控制要求较高，为确保码头使用安全，出灰码头施工图仍按工况 2 方案对西端部排架进行了加强。

5 结语

1)对于横摇撞击力这种对称性水平荷载，平面计算的桩基轴力结果与码头结构分段端部自由的端部排架桩基轴力结果基本相当，但大于中间排架及端部存在约束的端部排架桩基轴力结果；对于系缆力和靠岸撞击力非对称性水平荷载，平面计算的桩基轴力结果普遍大于空间计算的结果。

2)端部排架布置双排桩加强后，其抗水平力刚度增加，端部加强排架承担了更多的水平荷载。码头结构的位移会有一定程度减小，虽然位移减小的绝对值不大，但是减小比例并不低。对承受较大水平荷载且对位移控制有严格要求的码头而言，可采用双排桩布置形式对端部排架进行加强。

3)从桩力计算结果和位移计算结果来看，在有相邻结构提供可靠的水平约束时，端部排架桩基布置斜桩改成直桩，在承受水平荷载时影响不大。

4)在承受非对称性水平荷载时，码头结构会发生偏转，空间计算位移结果要远大于平面计算位移结果，平面计算对纵向位移的忽略既不合理也不安全。对码头位移控制要求高的码头建议采用空间计算方法进行设计，且每个结构分段宜设置纵向叉桩抵抗纵向水平力以减小纵向位移。

参考文献：

[1] 张毅文.高桩码头的空间性对结构计算的影响分析[D].天津:天津大学,2014.

[2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第三航务工程勘察设计院有限公司,中交第四航务工程局有限公司.码头结构设计规范:JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[3] 姚辉,蒋乐群,范忆平,等.高桩码头计算方法探讨[J].水运工程,1996(6):10-17.

[4] 董华钢.高桩码头设计按空间与平面计算方法的比较[J].水运工程,2001(9):36-37.

[5] 黄涛,周杰鑫,马平.空间有限元模型和平面模型在高桩码头结构计算中的比较分析[J].中国水运,2013(1):60-61.

[6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第二航务工程勘察设计院有限公司.港口工程荷载规范:JTS 144-1—2010[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2010.

[7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范:JTS 145—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[8] 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(2):132-137.

(本文编辑 王璁)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www.sygccom.cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部