

# 新型整体卸荷式板桩码头设计

高倩 高增吉

1. 烟台市建筑设计研究股份有限公司, 山东 烟台 264000
2. 烟台金洋土木工程技术开发有限公司, 山东 烟台 264006

[摘要] 本文提出了一种在国内尚未广泛采用的以管式钢板桩作为前墙的整体卸荷式板桩码头的结构型式, 并较详细地说明了设计方法。这种结构型式适用于万吨级以上大型码头, 不仅施工进度快, 而且避免了水下施工这种艰苦困难的工序, 比同条件下的重力式码头可以节省造价20%以上, 代表了大型码头结构更新换代的发展方向。

[关键词] 板桩; 码头; 设计

## Design of New Type Monolithic Unloading Sheet Pile Wharf

GAO Qian, GAO Zengji

- 1 Yantai Architectural Design Research Co., Ltd., Shandong Yantai, China 264000
- 2 Yantai Jinyang Civil Engineering Technology Development Co., Ltd., Shandong Yantai, China 264006

**Abstract:** This paper presents a structural type of integral unloading sheet pile wharf with tubular steel sheet pile as front wall, which has not been widely used in China, and the design method is explained in detail. This type of structure is suitable for large-scale wharves above 10,000 tons, not only the construction progress is fast, but also the difficult working procedure of underwater construction is avoided. Compared with the gravity type wharf under the same conditions, the cost can be saved by more than 20%. It represents the development direction of the upgrading of large-scale wharf structure.

**Keywords:** Board pile; Dock; Design

通常锚拉式板桩码头由于其本身抗载能力较弱, 很难做成万吨级以上大码头, 一般只适合于 5000 吨级以下小型码头。但是, 近 10 年来由于船舶的大型化导致了码头大型化, 国内也建设了一些比较大的板桩式码头。这些板桩码头一般采用遮帘式和卸荷式等结构型式, 其前墙多采用地下连续墙结构。在国外由于大型重力式码头必须进行的水下基床整平的难度和造价越来越高, 导致了大型岸壁式码头大量采用板桩式结构而不是重力式。在中国由于劳动力价格的提高和钢产量的过剩, 在地质情况允许的情况下, 少用重力式多用钢结构板桩式也是码头结构型式发展的必然趋势

本文介绍一种新型结构型式的 3 万吨级整体卸荷式板桩码头。前墙采用钢管式钢板桩, 卸荷平台采用钢管叉桩, 前墙和平台之间采用钢筋混凝土板相连。

本码头结构的特点如下:

- (1) 采用大刚度的管式钢板桩作为前墙, 而不采用“遮帘式”结构。结构型式比“遮帘式”简单, 简化了施工工艺。
- (2) 采用叉桩承受水平力, 增加了承载能力。
- (3) 采用钢筋混凝土板将前墙、直桩、叉桩连接起来, 形成整体结构, 而不采用钢拉杆。
- (4) 自身稳定, 无锚拉结构。
- (5) 采用陆域施工法, 工期较短。本工程 444m 仅用了 10 个月竣工。

### 1 水工建筑物的种类和安全等级

本码头安全等级为二级。

### 2 设计条件

#### 2.1 水工建筑物主尺度

根据总平面布置方案, 本工程水工建筑物主尺度如表 1。

**表1 水工建筑物的主要尺度表**

泊位数	长度 (m)	顶面高程 (m)	底面高程 (m)	备注
2	444.00	7.30	-11.9	

**2.2 工艺荷载**
**2.2.1 堆货荷载**

本工程为木材码头，根据《港口工程荷载规范（JTS 144-1-2010）》一般装卸条件下木材码头， $q_1=30\text{Kpa}$ ，分布范围为：码头前沿线至 15.5m。 $q_2=60\text{Kpa}$ ，分布范围为：前沿线 15.5m 至 44.75m。

**2.2.2 起重机荷载**

根据装卸工艺方案，每个泊位配置 1 台 25t-36m 门机和 1 台 40t 门座式起重机。

**(1) 40t 门座式起重机**

门机轨距 10.5m，每腿 8 轮，轮距 0.85m，最大轮压 400kN，

水平力标准值 570kN。

**(2) 25t 门座式起重机**

门机轨距 10.5m，每腿 8 轮，轮距 0.85m，最大轮压 250kN，水平力标准值 455kN。

**2.2.3 水平运输机械荷载**

40t 原木托盘车、16t 原木装载机、16t 曲臂液压起重机、42t 集装箱拖挂车等。经换算，以上车辆轮压对于码头的作用小于 60Kpa。

**2.3 气象、水文条件**
**2.3.1 气象**
**(1) 风**

最大风速 23m/s，最大平均风速 3.5m/s。

**(2) 气温**

历年极端最高气温 36.0℃ 历年极端最低气温 -28.1℃

年平均气温 9.2℃ 最高月平均气温 27.6℃

最低月平均气温 -12.2℃

**2.3.2 水文**
**(1) 自然海底高程**

本码头所在海域建设前海底高程为 0-0.5m。自然水深很浅。

**(2) 设计水位（以当地理论最低潮面起算，下同）**

设计高水位 5.57m 设计低水位 0.41m

极端高水位 7.01m 极端低水位 -1.83m

**(3) 波浪**
**表2 码头设计波浪要素（SE 向、重现期 50）**

	$H_{1\%}$ (m)	$H_{4\%}$ (m)	$H_{5\%}$ (m)	$H_{13\%}$ (m)	T (s)
极端高水位	1.62	1.37	1.32	1.10	7.8
设计高水位	1.52	1.28	1.24	1.03	7.8
设计低水位	1.42	1.20	1.16	0.97	7.8
极端低水位	0.62	0.52	0.51	0.42	7.8

**(4) 海流**

涨潮流最大流速 0.95m/s，流向 253°，落潮流最大流速 0.76m/s，流向 117°。

**(5) 海冰**

本工程海域冰型以流冰为主，流冰厚度为 5~15cm。流冰块水平尺度为 0.5m-6m，流冰块平均漂流速度为 0.3~0.4m/s，最大漂流速度为 1.2 m/s。

**2.4 地质条件**

地层由上而下为：①淤泥质粉质粘土（Q4m）、②粉质粘土（Q4a1）、③1粉质粘土（Q3a1）③2粉砂（Q3a1）、③3粘土（Q3a1）、④粉砂（Q3a1）、⑤碎石（Q3a1+p1）、⑥1全风化片麻岩（Arc）、⑥2强风化片麻岩（Arc）。各层土性质如表 3 和表 4。

表3 地基承载力设计值

层号	地层名称	低高程 (m)	$f_d$ (kPa)
①	淤泥质粉质粘土	0~-5.19	60
②	粉质粘土	-6.85~-14.16	100
③1	粉质粘土	-10.83~-16.16	200
③2	粉砂	-11.31~-14.20	160
③3	粘土	-16.66~-27.83	220
④	粉砂	-27.13~-25.77	180
⑤	碎石	-27.54~-30.39	260
⑥-1	全风化片麻岩	-27.54~-30.39	280
⑥-2	强风化片麻岩	-25.79~	500

表4 桩基参数表

地层编号	岩土名称	打入桩		灌注桩		
		$q_f$ (kPa)	$q_R$ (kPa)	$q_f$ (kPa)	$q_R$ (kPa)	
				泥浆护壁	钻(冲)孔桩	干作业钻孔桩
①	淤泥质粉质粘土	10		12		
②	粉质粘土	32		30		
③1	粉质粘土	65		60		
③2	粉砂	48		25		
③3	粘土	75	1500	70	1500	2500
④	粉砂	60	3000	40	1000	1800
⑤	碎石	180	7000	150	3000	4500
⑥1	全风化片麻岩	150	5000	130	1500	2000
⑥2	强风化片麻岩	220	8000	180	2300	2500

### 2.5 地震设防

本地区抗震设防烈度为6度，设计基本地震加速度值为0.05g，设计地震分组为第一组。

### 3 结构方案

码头前沿设计底高程为-11.9m；码头顶面高程为7.3m，距前沿线1.0m设钢板桩；钢板桩后设钢管桩排架，排架上浇筑钢筋混凝土卸荷承台，承台前部为胸墙。

前墙采用“ $\phi 900$ 管式”（ $\phi 900 \times 16$ ）钢板桩（Q345）。

排架由2支直桩和2组叉桩组成，桩横向间距3.5m。排架纵向第1支、第3支、第6支桩间距为6m，其余桩间距3m。第5支桩为 $\phi 700 \times 14$  Q345螺旋钢管，其余为 $\phi 600 \times 14$  Q345螺旋钢管。

承台采用现浇钢筋混凝土板连接承台基桩和前墙。承台板顶高程为4.2m，底高程3.0m，厚度为1.2m；承台海侧现浇“口”形胸墙。

吊车轨道梁宽0.8m，高3.1m，与承台整体浇筑。

本结构不设锚拉结构，依靠排架抵抗水平力。

系船设施采用850kN系船柱。护舷采用DA-A800H $\times$ 3000。

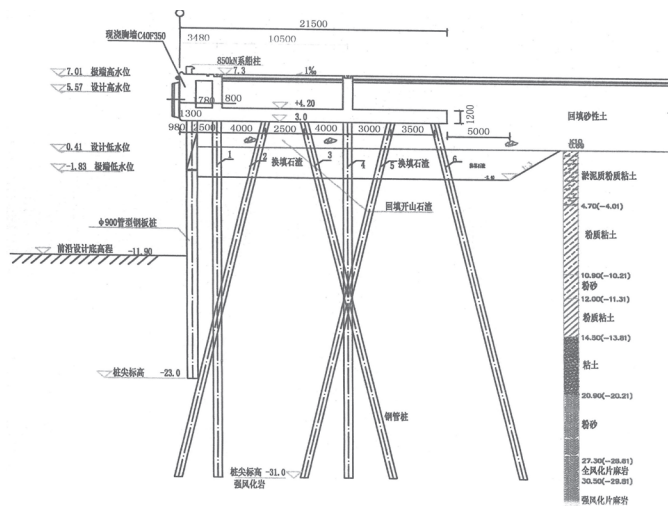


图1 码头断面图

桩设计参数表						
桩号	规格	材料	间距(m)	桩长(m)	桩型	备注
钢板桩						
	$\phi 900$ 管型	Q345	连续	24.0	直	
1	$\phi 600 \times 14$	Q345	6	34.0	直	
2	$\phi 600 \times 14$	Q345	3	34.8	斜	
3	$\phi 600 \times 14$	Q345	6	34.8	斜	
4	$\phi 600 \times 14$	Q345	3	34.0	直	
5	$\phi 700 \times 14$	Q345	3	34.8	斜	
6	$\phi 600 \times 14$	Q345	6	34.8	斜	
$\phi 900$ 管式钢板桩参数表						
外径 (mm)	壁厚 (mm)	每米宽板桩				材质
		断面积 (cm <sup>2</sup> /m)	重量 (kg/m)	惯性矩 (cm <sup>4</sup> /m)	抵抗矩 (cm <sup>3</sup> /m)	
900	16	470.1	370	406000	9020	Q345

说明:

1. 图中尺寸以毫米计；高程以米计，采用当地理论最低潮面；
2. 钢管桩桩尖要求至强风化岩顶。
3. 斜桩倾角12°，转角10°。

## 4 主要外力计算

①自重：根据各构件的体积和比重计算。

②土压力：分主动土压力、被动土压力、静止土压力和竖向荷载产生的土压力，按库伦理论计算。

③水压力：本工程为剩余水压力。剩余水压力取 1/2 平均潮差。本海域平均潮差为 3.69m。剩余水头 1.85m。

④波浪力：根据《港口与航道水文规范》（JTS 145-2015）计算，不同水位的波浪力如表 5。

表5 每延米直墙上所受的波谷波浪力作用值

设计水位	波浪力和弯矩	
	P' (kN)	MP' (kNm)
极端高水位	210.51	224.23
设计高水位	199.53	411.75
设计低水位	154.48	845.91
极端低水位	131.08	899.68

⑤系缆力

经计算，系缆力标准值  $N=849.0\text{kN}$ ，选用 850kN 系船柱。

⑥挤靠力

经计算，挤靠力  $F_{j'}=271.88\text{kN}$ 。

⑦撞击力

经计算，在船舶靠岸和波浪作用下的最大有效撞击能量  $E_w=355.74\text{kJ}$ ，选用 DA-A800H×L3000（标准反力型）橡胶护舷，每组护舷的设计吸能量为 463kJ，设计反力 1375kN。

## 5 作用与作用效应组合

### 5.1 设计水位

计算水位应分别采用设计高水位、设计低水位、极端高水位和极端低水位。

### 5.2 作用组合

（1）持久组合

在设计高水位、设计低水位、极端高水位和极端低水位下分别计算下列组合：

组合 1：永久作用 + 波吸力（主导可变）+ 堆载（非主导可变）+ 门机（非主导可变）

组合 2：永久作用 + 船舶系缆力（主导可变）+ 堆载（非主导可变）+ 门机（非主导可变）

组合 3：永久作用 + 门机（主导可变）+ 堆载（非主导可变）+ 船舶系缆力（非主导可变）

（2）短暂组合

在设计高水位、设计低水位和施工水位下计算下列组合：永久作用 + 施工期荷载

（3）地震组合

在设计高水位和设计低水位下计算下列组合：结构自重 + 地震力 + 堆货荷载

## 6 结构计算

### 6.1 计算内容

计算内容包括：

（1）前墙入土深度（踢脚稳定）和前墙的内力

（2）承台桩结构内力计算

（3）承台内力计算

（4）构件计算

（5）地基整体稳定性计算

### 6.2 计算图式

（1）前墙

前墙主要承受主动土压力、剩余水压力、波浪力和分担的垂直力。采用竖向弹性地基梁法计算，受力模型如图 2 所示。

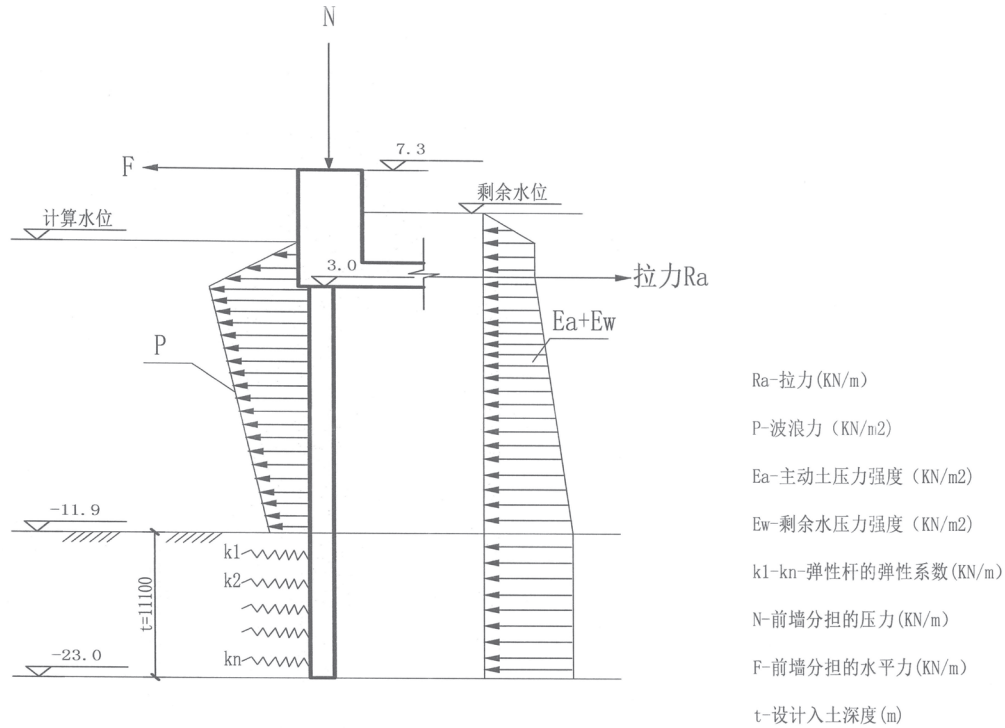


图2 前墙计算图式(竖向弹性地基梁法)

(2) 叉桩

叉桩主要承受前墙和胸墙通过钢筋混凝土板传来的水平力(包括主动土压力、系缆力、撞击力、挤靠力等分配给叉桩的水平力)、分担的竖直力、自身面积所受的主动土压力。受力模型如图3所示。

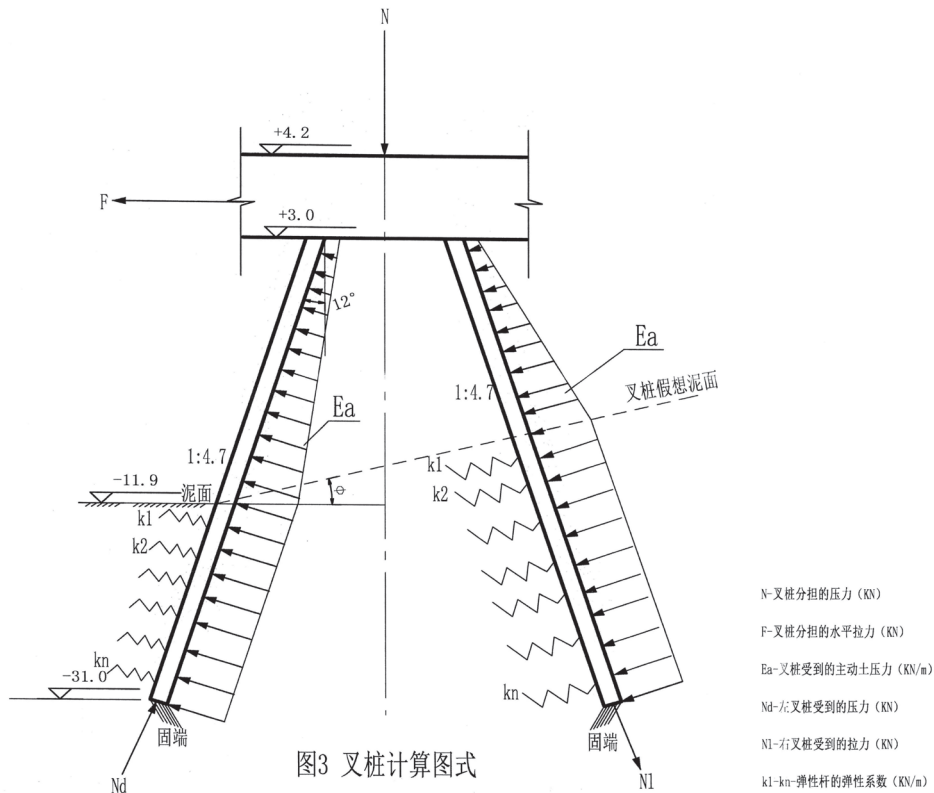


图3 叉桩计算图式

(3) 直桩

直桩主要承受分担的竖直力、吊车轮压、自身面积所受的主动土压力。

(4) 钢筋混凝土板

钢筋混凝土板主要承受前墙的拉力、码头工艺荷载(堆货荷载、流动机械荷载等)的竖向力。

### 6.3 计算结果

根据上述计算图式采用适用的软件进行计算，结果如下：

(1) 板桩计算。板桩计算结果如表 6 和表 7。

表6 板桩计算结果

		承载能力极限 状态持久组合	承载能力极限 状态短暂组合	承载能力极限 状态地震组合	正常使用极限状 态准永久组合
$M_{max}$ (kNm/m)	+	1415.26	1329.64	467.35	1002.22
	-	1537.29	1504.91	648.10	1095.88
$Q_{max}$ (kN/m)	+	497.73	497.73	199.27	353.61
	-	473.39	442.00	158.60	333.43
$N_{max}$ (kN/m)		1102.72	1102.32	109.55	750.90
位移 (mm)		43.95	42.73	24.56	42.17
地基反力 (kPa)		283.38	262.97	79.53	199.27
应力 (MPa)		193.61	189.54	53.06	138.02
板桩型号		“管型”： $\phi 900 \times 14$ ，加抗腐蚀后为 $\phi 900 \times 16$			

表7 踢脚稳定汇总表

组合类型	倾覆力矩最大值 (kNm/m)	对应抗倾覆力矩 (kNm/m)	是否稳定
承载能力极限状态持久组合	27522.03	48377.37	是
承载能力极限状态短暂组合	17425.83	48377.37	是
承载能力极限状态地震组合	5618.2	48377.37	是

(2) 承台桩计算。承台桩最大内力计算结果如表 8 和表 9

表8 承台桩内力最大值(承载能力组合)

桩	水平位移 (mm)	弯矩 (kNm)	剪力 (kN)	地基反力 (kPa)	轴力 (kN)	$\sigma$ (Mpa)	是否满足
1.03	243.89	39.76	14.74	1699.36	108.66	是	1.03
19.53	385.71	155.05	983.61	3740.13	205.97	是	19.53
4.72	352.25	172.77	983.21	3591.45	193.74	是	4.72
1.36	197.39	35.27	10.91	3971.18	164.1	是	1.36
19.19	522.58	211.54	1286.11	4981.28	221.4	是	19.19
4.17	601.9	210.76	1042.13	3659.29	194.93	是	4.17

表9 承台桩内力最大值(正常使用组合)

桩	水平位移 (mm)	弯矩 (kNm)	剪力 (kN)	地基反力 (kPa)	轴力 (kN)	$\sigma$ (Mpa)	是否满足
1	0.22	166.84	27.55	10.21	1118.71	102.09	是
2	19.44	260.06	104.48	663.21	2521.73	194.42	是
3	4.22	225.54	97.5	629.54	2299.56	173.67	是
4	0.52	141.18	25.08	7.76	2612.38	155.01	是
5	19.13	354.44	143.49	872.31	3378.59	210.23	是
6	3.82	425.71	102.7	682.58	2396.77	187.65	是

(3) 单桩承载力计算。经计算，单桩承载力如表 10

表10 单桩承载力表 单位：kN

序号	桩	结构要求承载力	承载力	结 论
1	$\phi 600 \times 12$ 直桩	1761.28	4576.55	满足
2	$\phi 600 \times 12$ 斜桩	3931.31	4436.72	满足
3	$\phi 600 \times 12$ 斜桩	3190.21	4436.72	满足
4	$\phi 600 \times 12$ 直桩	3872.25	4576.55	满足
5	$\phi 700 \times 12$ 斜桩	5192.68	5459.93	满足
6	$\phi 600 \times 12$ 斜桩	3173.49	4436.72	满足
3	板桩 $\phi 800 \times 14$	1080.93/m	2273.15/m	满足

(4) 承台内力。承台钢筋混凝土板内力如表 11。

表11 承台板内力表

组合名称	MX (kNm)	MY (kNm)	Qx (kN)	Qy (kN)
持久组合 (Max)	535.36	267.01	1590.32	1509.66
持久组合 (Min)	-1176.95	-1434.37	-1478.98	-1295.11
准永久组合 (Max)	346.02	172.58	1027.88	975.75
准永久组合 (Min)	-760.71	-927.09	-955.92	-837.08

组合名称	MX (kNm)	MY (kNm)	Qx (kN)	Qy (kN)
短期效应组合 (Max)	401.2	200.1	1191.8	1131.35
短期效应组合 (Min)	-882.02	-1074.93	-1108.36	-970.57
承载能力状态 (Max)	535.36	267.01	1590.32	1509.66
承载能力状态 (Min)	-1176.95	-1434.37	-1478.98	-1295.11
正常使用状态 (Max)	401.2	200.1	1191.8	1131.35
正常使用状态 (Min)	-882.02	-1074.93	-1108.36	-970.57

(5) 地基整体稳定计算。按《港口工程地基规范 (JTS 147-1-2010)》规定的方法, 使用上海易工工程技术服务有限公司开发的“土坡稳定 CAD 与计算软件 V2.0”计算, 结果如表 12。

表12 整体稳定计算成果表

圆心x (m)	圆心y (m)	半径R (m)	滑动力 (kN/m)	滑动力矩 (kN·m/m)	抗滑力 (kN/m)	抗滑力矩 (kN·m/m)	抗力系数 $\gamma R$
-1.685	15.202	36.347	4201.97	152693.6	6741.07	244982.1	1.60

## 7 耐久性设计

码头主体结构的使用年限为 50 年。为确保码头结构 50 年使用寿命的要求, 采用以下耐久性设计。

- 1) 胸墙处在水位变动区和浪溅区采用 C40F350 高性能混凝土, 以提高耐久性。
- 2) 管式钢板桩和钢管桩。采用防腐涂层、预留腐蚀厚度、牺牲阳极、通直流电相结合的方法进行防腐保护。
- 3) 码头附属设施。系缆桩预埋件涂沥青漆并用沥青混凝土保护。护舷预埋件采用不锈钢。

## 8 单位工程量

本码头单位工程量如表 13。

表13 单位工程量表 (每米码头)

序号	项目	单位	数量
1	基础工程		
1.1	陆上回填开山石渣	m <sup>3</sup>	470.00
1.2	护底块石	m <sup>3</sup>	8.96
2	前墙和承台桩工程		
2.1	管式钢板桩 (900×16) Q345	t	8.88
2.2	钢板桩防腐	m <sup>2</sup>	71.08
2.3	铝-锌-钢系合金牺牲阳极	kg	39.09
2.4	承台钢管桩 Q345	t	10.97
2.5	承台钢管桩防腐	m <sup>2</sup>	102.14
3	上部结构		
3.1	现浇胸墙 C40F350	m <sup>3</sup>	30.44
3.2	现浇后轨道梁 C30	m <sup>3</sup>	2.96
3.3	护轮坎 C40F350	m <sup>3</sup>	0.01
3.4	现浇胸墙素混凝土垫层 C15	m <sup>3</sup>	2.20
3.5	钢筋 3级	t	3.34
4	码头设施		
4.1	系船柱 (850kN) ZG35	个	0.04
4.2	DA型护舷 (DA-A800×2500标准反力型)	套	0.12
4.3	D型护舷 (D300×1500)	套	0.42
4.4	钢轨及配件	m	1.95

## 9 单位造价

根据《沿海港口水工建筑工程定额 (2004)》和当地材料、机械和劳动力价格以及交通部规定的计算方法, 本码头主体工程单位造价为 22.74 万元 /m, 比沉箱重力式低 24.5%。

### [参考文献]

[1] 交通运输部《码头结构设计规范 (JTS 167-2018)》[S]. 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] 刘永绣. 板桩和地下墙码头的设计理论和方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

作者简介: 高倩, (1991-), 2013年6月毕业于大连理工大学土木工程系, 2014年在烟台金洋土木工程技术开发有限公司从事港口工程设计, 2015年考上烟台大学土木工程系硕士研究生, 2019年6月获得土木工程硕士学位, 2019年6月到烟台市建筑设计研究股份有限公司工作。