

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.025

某海港码头直立式沉箱过渡段受力特性 物理模型试验研究

曹昌志

(苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 针对直立式沉箱构筑物工程量小, 造价合理, 但未推广应用, 对其受力特性研究较少的背景, 为研究广东某海港码头直立式沉箱结构过渡段的受力特性与泊稳条件, 采取物理模型试验研究方法, 建立1:40的正态水槽风浪物理模型试验, 从结构所受波浪力、直立式沉箱堤顶越浪量、堤前护顶块石稳定性等方面对直立式沉箱过渡段受力特性进行研究分析。分析结果表明, 实例工程码头过渡段采用直立式沉箱结构满足结构受力和泊稳要求, 码头断面越浪量较小, 结构方案合理可行。

关键词: 直立式码头; 波浪力; 越浪量; 结构稳定性

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0143-05

Physical Model Test of Mechanical Characteristics of Vertical Caisson Transition Section in a Harbour Wharf

CAO Changzhi

(JSTI GROUP, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Focusing on the issue of insufficient application and research of on its mechanical characteristics of vertical caisson structures which has small engineering quantity and reasonable cost, this paper took a harbor wharf vertical caisson structure in the transitional period of stress characteristic and the berthing conditions in Guangdong province as an example, physical model test research was adopted to establish a 1:40 normal flume and physical model test, the structure is constructed by the wave force, vertical caissons, the flowmeter and the canopy guard stone before embankment stability of vertical caisson transition section to analyze the mechanical characteristics. The results show that the vertical caisson structure is adopted in the transition section of the wharf can meet the requirements of structural stress and berthing stability.

Keywords: vertical-face wharf; wave force; quantities of waves; structural stability

随着水运工程的迅猛发展, 我国沿海码头吞吐量逐年提升, 船舶尺度发展呈大型化趋势, 因此海港工程不断向深水海域延伸。由于深水海域风浪大, 自然条件恶劣, 需要在设计阶段对码头结构的波浪特性及受力特性进行系统分析, 确保码头在极端工况下的稳定性^[1]。

由于直立式沉箱结构还未广泛应用, 对于直立式沉箱过渡段受力特性研究较少, 目前只有若干学者、专家采用物理模型试验研究对其进行相关研究^[2-6]。重庆交通大学的钟亮教授^[7]采用正态物理模型试验的方法, 分析了广西某直立式沉箱挡墙的

结构稳定性和挡墙受力特性。天津大学的刘庆生教授^[8]采用波浪试验, 分析了渤海湾某直立式沉箱结构段的特征水文、波浪参数, 并分析了各特征工况下的码头泊稳情况。

广东某海港码头位于广东省湛江市西南沿海部分, 码头共设置一个重件泊位和一个煤炭泊位, 两个泊位之间通过造价较为经济的直立式沉箱结构作为过渡段。根据2000年—2015年工程海域的波浪要素统计资料, 工程处风浪大、建设条件恶劣。因此, 借助物理模型试验, 从结构所受波浪力、直立式沉箱堤顶越浪量、堤前护顶块石稳定性等方面对直立式

沉箱过渡段受力特性进行验证,为断面结构设计提供依据。

1 工程概况

1.1 工程方案设计

工程采用“L”型单堤掩护布置形式,利用码头、引堤将本海域 SSE—WNW 主浪向予以掩护,工程平面布置图见图 1。煤炭泊位与重件泊位采用直立式沉箱结构型式,重件码头与陆域连接段为斜坡堤结构型式,煤炭泊位与重件泊位之间采用直立式沉箱结构。

直立式沉箱结构采用抛石基床,基床底宽 42.55 m,基床两侧采用抛填块石护坡,护坡开挖坡线为 1:1.5,块石重量在 10 kg ~ 100 kg 范围内。边坡采用 150 kg ~ 200 kg 的大型块石作为保护。基床上部为沉箱结构,沉箱底部高程为 -17.80 m,顶部高程为 1.20 m,沉箱尺寸为 30.5 m × 15.3 m × 19 m(长 × 宽 × 高)。胸墙混凝土等级为 C40,回填砂粒径为 10

mm ~ 100 mm。沉箱顶部为 C40 现浇挡浪墙。

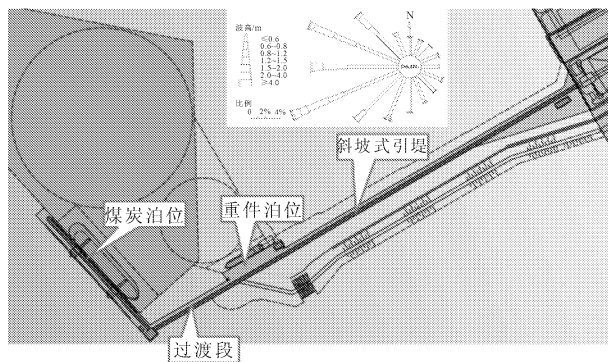


图 1 工程平面布置

1.2 工程波浪、水位特征

工程海域潮汐周期为 12 h,且涨潮与落潮过程流速呈镜像分布。根据统计结果,工程海域特征水位及对应的波浪要素见表 1。表 1 中, $H_{1\%}$ 、 $H_{13\%}$ 分别为 1% 频率和 13% 频率的波高。

表 1 工程海域水位、波浪特征值

工况	特征水位	水位值/m	重现期/a	$H_{1\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	周期	含沙量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	极端高水位	4.07		9.15	6.82	8.32	0.37
2	设计高水位	2.67	50	9.23	6.51	8.42	0.22
3	设计低水位	-0.89		8.15	5.64	8.42	0.15
4	极端低水位	-1.71		7.75	5.52	8.42	0.11

1.3 风况特征

根据工程海域近二十年风况统计资料,工程海域最主要风向为 SE(东南方向,频率为 8.75%),其他主要风向有 ESE(东南偏东方向,8.22%)及 NE(东北方向,7.91%)。工程海域最大风速可达 22.5 m/s(2003 年,风向为 SE),平均风速为 7.76 m/s。

2 物理模型试验设计

2.1 试验目的

为验证实例工程的受力特征与泊稳情况,本次物理模型试验需研究以下内容:

(1) 在各特征工况下,沉箱、胸墙以及码头顶面的受力情况。

(2) 在各特征工况下,堤顶每延米在单位时间内的越浪量。

(3) 在各特征工况下,基床两侧边坡压护块石的位移量及稳定性。

2.2 试验设计与布置

采用风浪试验水槽完成本项目的物理试验工作。风浪试验水槽采用 1:40 的正态模型。根据水

工模型试验要求以及本次物理模型试验特征,经计算可知时间比尺为 6.35,流量比尺为 252.98,力比尺为 64 000,糙率比尺为 $7.92^{[9-12]}$ 。

风浪试验水槽几何尺寸为 68.0 m × 1.0 m × 1.5 m(长 × 宽 × 高),水槽顶部采用半圆形结构封顶,为保证更好地观察各工况下风浪情况,顶部及两侧挡墙材质均选择有机玻璃。造波机布置在水槽右端,根据工程海域波浪特性,本次试验采用波浪特性为不规则波;在造波机处设置波高测量仪,在水槽左端设置风机,模拟工程实际风况。在水槽两段均设置消波装置,减小波浪对水槽内水位的影响,提高试验精度。风浪试验水槽布置图见图 2。

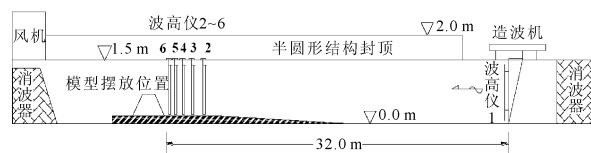


图 2 风浪实验室水槽布置

2.3 波浪设计

根据文献[13-15]的研究结论,根据工程海域波浪特性,本次试验采用波谱为 JONSWAP 谱的不规

则波,其表达式为:

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp[-(f/f_p - 1)^2 / 2\sigma^2]}$$

(1)

其中:

$$\beta_J = \frac{0.06238}{0.230 + 0.336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] T_p = \frac{T_{H_{1/3}}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases}$$

$$f_p = T_p^{-1}$$

式中: f 为波浪频率; f_p 为峰值波浪频率; $H_{1/3}$ 为平均波高等效值; $T_{H_{1/3}}$ 为等效平均波高对应的波浪周期; $S(f)$ 为 JONSWAP 谱函数; γ 为 JONSWAP 谱波特征因子,根据文献[14]取 2.75; σ 为无维普参数。

2.4 试验方法

为满足试验要求,试验方法须满足以下条件:

(1) 在沉箱、胸墙以及码头顶面布置 SG2008 型压力传感器,试验中对每个特征工况均连续布置 100 次波浪作用过程,对每次过程进行压力采集,并取各次测点的均值。

(2) 在港池侧胸墙上方设置接水装置,进行模型越浪量测量,除以接水宽度及时间及得到模型单宽越浪量,然后再换算成原型堤顶每延米在单位时

间内越浪量。

(3) 观察各工况下基床两侧边坡压护块石是否稳定、护面表面是否变形^[16],并选择几个典型块石进行特征点标记,记录位移量,从而综合判断压护块石的位移量及稳定性。

3 试验成果与分析

3.1 受力试验成果与分析

对表 1 各工况下胸墙迎浪面、顶面进行受力测量。受力试验结果见表 2。分析表 2 可知:

(1) 码头顶面所受水平冲击力与水位高低成正比;最大冲击力为 384.7 kN/m,最小冲击力为 128.9 kN/m。

(2) 沉箱和胸墙所受最大水平力、浮托力均在工况 2(设计高水位)下,其中,沉箱最大水平力为 1 522.9 kN/m,浮托力为 577.3 kN/m,胸墙所受最大水平力为 945.6 kN/m。

沉箱和胸墙所受最大水平力、浮托力没有出现在极端高水位下的原因是因为该工况下越浪量较大,减少了对沉箱和胸墙的冲击作用。

(3) 根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)中式(7.3.2-4)等号左边部分定义为综合滑移荷载,等号右边部分定义为综合抗滑荷载。

分析可知,各工况下综合抗滑荷载均远大于综合滑移荷载,满足规范要求。

表 2 各工况下受力试验结果

工况	沉箱水平力 / (kN·m ⁻¹)	沉箱浮托力 / (kN·m ⁻¹)	胸墙水平力 / (kN·m ⁻¹)	码头顶面水平冲击力 / (kN·m ⁻¹)	总水平力 / (kN·m ⁻¹)	沉箱胸墙整体总竖向力 / (kN·m ⁻¹)	综合抗滑荷载/综合滑移荷载
1	1452.5	638.9	622.5	384.7	2015.6	244.3	2.79
2	1522.9	577.3	945.6	251.2	2523.7	326.1	2.66
3	1502.9	552.3	471.6	194.5	1977.6	374.4	2.72
4	1068.9	445.7	221.3	128.9	1288.6	375.2	2.61

将工况 1 和工况 2 下沉箱和胸墙所受压力分布绘于图 3。分析图 3 可知:

(1) 在各工况下,最大波浪压强出现在迎水面沉箱顶面附近。

(2) 工况 1 下最大波浪压强为 104.32 kPa,工况 2 下最大波浪压强为 103.84 kPa。各工况下波浪压强分布差异较小。最大/最小波浪压强比在 2.0 左右。

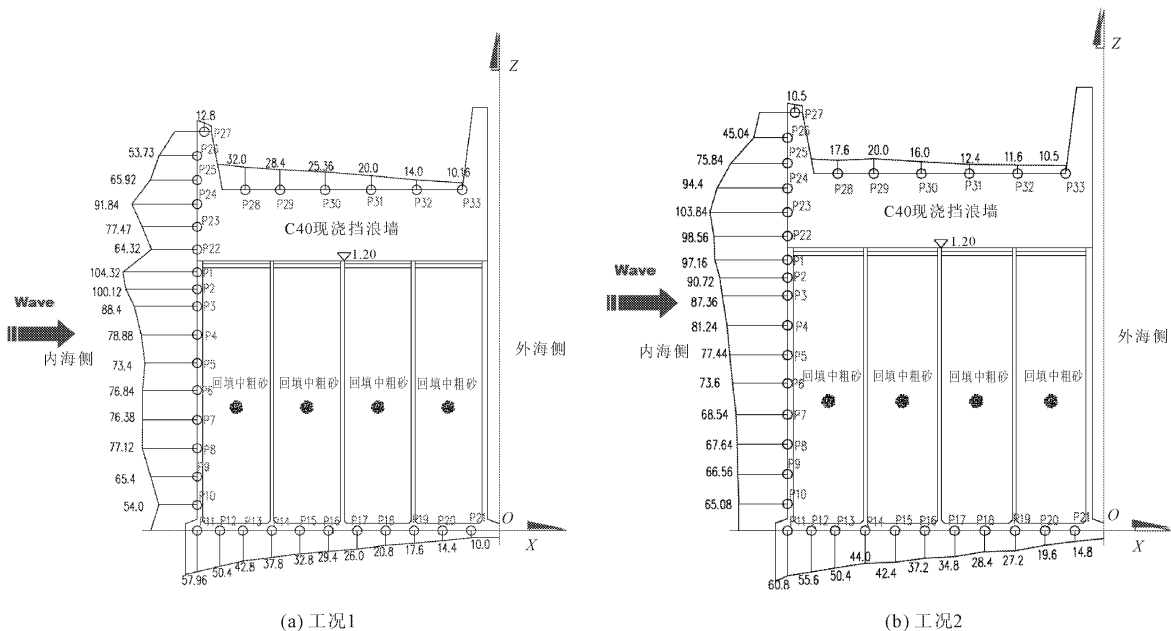
3.2 断面越浪量统计

采用直立堤各小范围断面模型、大范围整体模型两类模型,对各工况下直立堤堤顶的越浪量进行统

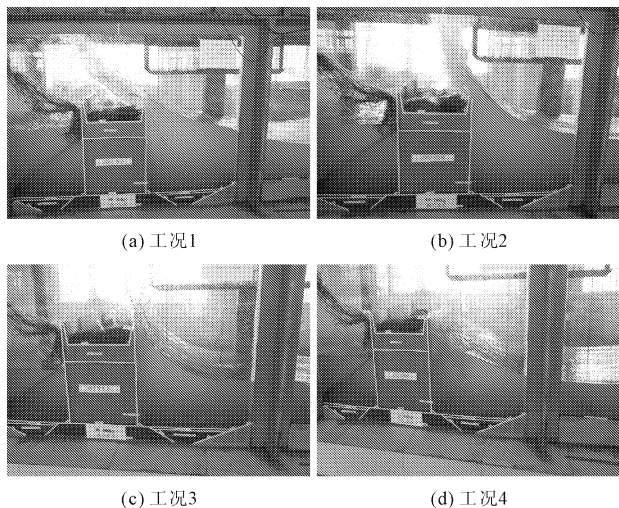
计。各工况下断面模型试验效果见图 4,并选择工况 1 为代表,工况 1 下大范围整体模型试验效果见图 5。各工况下越浪量统计结果见表 3。

表 3 工况 1 下整体模型堤顶越浪试验效果

试验工况	越浪量/(m ³ ·m ⁻¹ ·s ⁻¹)		是否能直接越浪	
	整体模型	断面模型	整体模型	断面模型
1	0.033	0.291	是	是
2	0.009	0.195	是	是
3	0.002	0.033	否	否
4	0.002	0.009	否	否



(a) 工况1 (b) 工况2
图 3 工况 1 和工况 2 下沉箱和胸墙所受压强分布(单位:kPa)



(a) 工况1 (b) 工况2 (c) 工况3 (d) 工况4
图 4 各工况下断面模型堤顶越浪试验效果



图 5 工况 1 下整体模型堤顶越浪试验效果

分析图 4、图 5 可知，
(1) 在工况 1 和工况 2，码头前沿波浪冲击能量

较大，可以越过堤顶跌落至堤后。

(2) 在工况 3 和工况 4 下，码头前沿波浪基本不能越过直接越过码头堤顶，仅有少量上扬浪尖水体越过，大部分上升水体都以反射形式回到海域。

(3) 通过上述两组物理模型试验测量得到的越浪量对比结果可知，波浪断面试验所测的越浪结果明显大于整体物理模型试验。分析两者存在差别的主要原因为：

① 断面试验时，波浪仅能正向作用，考虑不了波浪方向性，而波浪整体物理模型试验可真是模拟波浪传播方向。

② 波浪越浪时，在断面试验中，波浪整体越上沉箱堤顶；而在波浪整体试验中，考虑到传播波浪之间的相位差，在整个过渡段长度上直立式结构上可能仅某局部存在越浪，但最后两者均取平均越浪量的结果，从而使两者存在显著差别。

③ 通过两组物理模型试验对比，认为整体模型试验结果更接近于实际情况，并采用该工况下越浪结果作为分析值。

(4) 各工况下，堤顶越浪量最大的为工况 1，达到 $0.291 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ，远小于设计要求值 $0.75 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。可见本工程采用直立式沉箱结构在各工况下堤顶越浪量均较小，满足泊稳要求。

3.3 护底稳定性分析

选择 5 个典型块石，在各工况下，5 个典型块石位移情况见表 4。分析可知，由于实例工程选择护底块石质量较大(150 kg ~ 200 kg)，且在各工况下，

块石上方淹没水深较深,最小值达到 16.2 m,因此连续波浪作用对块石稳定性影响较小,在各工况下,5 个典型块石整体稳定,没有出现翻越、旋转、倾覆等情况,护面未发生变形,最大位移仅为 2.2 mm,平均位移为分别为 1.8 mm、1.4 mm、1.4 mm、0.3 mm、0.2 mm,护底块石保持稳定。

表 4 各工况下 5 个典型块石位移情况

试验 工况	块石上方 淹没水深 /m	不同块石的位移/mm				
		块石 1	块石 2	块石 3	块石 4	块石 5
1	21.98	2.0	1.2	1.6	0.3	0.1
2	20.58	1.7	1.1	1.4	0.4	0.1
3	17.02	1.2	0.6	0.8	0.1	0.1
4	16.20	2.2	2.5	1.8	0.5	0.6

4 结 论

以广东某海港码头过渡段为研究实例工程,通过建立物理模型试验,从受力特性、堤顶越浪量、护底稳定性 3 个方面对过渡段稳定性进行了验证,研究结果显示:

(1) 在各工况下,沉箱最大水平力为 1 522.9 kN/m,浮托力为 577.3 kN/m,胸墙所受最大水平力为 945.6 kN/m,各工况下综合抗滑荷载均远大于综合滑移荷载,满足规范要求。

(2) 在各工况下,最大堤顶越浪量为 0.291 m³/(m·s),远小于设计要求值 0.75 m³/(m·s)。本工程采用直立式沉箱结构在各工况下堤顶越浪量均较小,满足泊稳要求。

(3) 实例工程护底块石质量较大(150 kg ~ 200 kg),且在各工况下,块石上方淹没水深较深,在各工况下,护底块石保持稳定,位移量趋近于 0。

(4) 根据物理模型试验研究,实例工程码头过渡段采用直立式沉箱结构满足结构受力和泊稳要求,结构方案合理可行。

参考文献:

[1] 尚晓田.波浪作用下后板桩高桩码头结构受力特性研

究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):69-75.

- [2] Nwogu O. A alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation [J]. Journal of Waterways Port Coastal and Ocean Engineering, 2013, 119(6): 618-638.
- [3] 蔡新永.基于船模的枢纽通航及码头靠离泊试验研究[J].水运工程,2018(9):119-123.
- [4] 薛润泽.软土地基中壁桩框架码头结构受力分析及稳定性计算方法[J].水运工程,2018(2):196-204.
- [5] 南京水利科学研究所.上海国际航运中心洋山港区潮流汐水流整体物理模型总体规划布局方案比选试验研究[R].南京:南京水利科学研究所,2014.
- [6] 南京水利科学研究所.上海国际航运中心洋山深水港一期工程方案定床泥沙物理模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究所,2013.
- [7] 钟 亮.广西防城港重件码头过渡段直立式沉箱结构设计及结构稳定物理模型试验研究[J].重庆理工大学学报,2016,3(6):35-39.
- [8] 刘庆生.天津港某码头近十年水文波浪分析及泊稳条件研究[J].甘肃科学学报,2017,2(12):121-130.
- [9] 石 雨.螺旋桨洗流在实体式码头前沿砂质海床上的间歇冲刷试验研究[J].水道港口,2017,35(8):458-463.
- [10] 吴亚楠,董 胜,张华昌.威海船厂港域泊稳试验研究与数值模拟[J].水运工程,2015(1):13-18.
- [11] 张华昌,柳玉良.青岛万达东方影都人工岛、游艇码头项目游艇码头港池泊稳物理模型试验报告[R].青岛:海军工程设计研究院工程综合试验研究中心,2014.
- [12] 冯卫兵,黄颖娜,厉佳卉.BW 模型在掩护水域内波浪计算中的应用[J].水运工程,2015(11):8-13.
- [13] Zheng L, Chen C, Liu H. A modeling study of the Satilla River Estuary, Georgia. Part I: flooding/drying process and water exchange over the salt marsh-estuary-shelf complex[J]. Estuaries, 2003, 26(3): 252-259.
- [14] 郑晓珣.基于 OPTIMOOR 的斜坡码头系留设施受力影响因素分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):45-48.
- [15] 唐东岳.台州湾近海海域波浪要素特征分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):27-33.
- [16] 周 晶.带有损伤的圆沉箱靠船墩结构的动力有限元分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):162-168.