

· 港口 ·



## 防波堤和码头一体的双圆筒沉箱结构设计

周惊慧, 郭大维, 路卫卫, 陈良志

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 针对兼具作业和防浪功能于一体的直立式双圆筒沉箱结构设计, 提出船舶作业期间平均越浪量 $\leq 0.1 L/(s \cdot m)$ 和风暴期间(100 a一遇)越浪量 $\leq 50 L/(s \cdot m)$ 的高程控制标准。研究双圆筒采用混凝土薄板和厚板2种连接方式, 并对其受力特性、计算模型、内力情况进行介绍。总结直立堤护底设计的推荐计算方法, 发现CEM图表法与3D物模试验一致, OCDI法计算结果偏大, 国标查图法计算块体稳定质量偏小。研究海侧挡浪墙设置在圆沉箱中部并设置反弧角的结构方案, 提出的EurOtop法适用性广且结果贴近试验值; 提出预制工字块封堵沉箱间填料并采用厚板连接堤头4个沉箱成整体的堤头保护方法; 通过开展2D、3D模型试验验证了结构方案的可行性。研究成果可为类似设计提供参考。

**关键词:** 防波堤和码头一体; 双圆筒沉箱结构; 受力特性; 计算模型; 模型试验

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0041-07

### Design of double cylindrical caisson structure integrating breakwater and wharf

ZHOU Jinghui, GUO Dawei, LU Weiwei, CHEN Liangzhi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** This paper discusses the design of a vertical double cylindrical caisson structure that combines both operation and prevention functions. It proposes the elevation design standards during ship operations that the average overtopping is less than  $0.1 L/(s \cdot m)$  and the overtopping is less than  $50 L/(s \cdot m)$  during storms (once in a hundred years). The paper studies two kinds of connection modes of double cylinders using concrete thin plates and thick plates, and introduced their stress characteristics, calculation models, and internal forces. It summarizes the recommended calculation methods for the design of vertical embankment bottom protection, and it is found that the CEM chart method result is consistent with the 3D physical model test, the OCDI method has a larger calculation result, and the national standard mapping method has a smaller calculation of block stability weight. Furthermore, it studies the structural scheme of setting the sea side wave wall in the middle of a circular caisson with a reverse arc angle, and proposes that the EurOtop method has wide applicability and the results are close to the experimental values. Then, a method for protecting the embankment head is proposed by sealing the filling between the caissons with prefabricated I-blocks and connecting the four caissons at the embankment head with thick plates as a whole. The feasibility of the structural scheme has been verified through conducting 2D and 3D model experiments. The research results can provide reference for similar designs.

**Keywords:** integrated breakwater and wharf; double cylindrical caisson structure; stress characteristics; calculation model; model test

目前, 越来越多的港口建设面向外海索取空间, 建设条件越趋恶劣。直立式沉箱结构由于其陆上预制、水上安装, 在大水深大波浪条件下对质量控制及工期控制等具有优越性, 而结构方案

设计是建设直立式沉箱码头关键。

石兴勇<sup>[1]</sup>提出一种兼具防波堤功能的双圆筒沉箱结构, 该结构设置2组纵向分布的圆筒沉箱组件, 底部均设置移动块和固定柱, 加强板设置

收稿日期: 2023-12-05

作者简介: 周惊慧(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事港口规划及设计工作。

在固定柱上。河海大学<sup>[2]</sup>提出一种具有防波堤功能的双圆筒沉箱结构，在圆筒沉箱外设连接沉箱的六角外壳卡接机构并固定安装在沉箱侧壁上，其上设缓冲堤，沉箱内设呈十字架状的加强架。Dang等<sup>[3]</sup>研究不同海浪和越浪水体作用下的各种形状的海堤结构，并进行越浪模拟以确定在相同波浪条件下减少越浪的最佳海堤结构。van Gent<sup>[4]</sup>研究斜向浪与垂直波相比对波浪越浪的减弱作用，提出考虑斜向浪对直立沉箱式防波堤有无弯曲胸墙的波浪越浪的影响。

本文介绍一种防波堤和码头一体的双圆筒沉箱结构，采用双排圆筒沉箱并排布置，满足船舶靠泊作业和防浪要求。本文介绍该结构的高程控制标准、双圆筒受力特性、计算模型、圆筒内力、护底设计、减少越浪措施、堤头防护等，并采用物理模型进行试验。

### 1 工程概况

项目地处地中海南岸，建设1个15万吨级散货卸船泊位，引堤及码头轴线采用“一”字形布置，轴线为北偏东30°，泊位布置在码头东侧<sup>[5]</sup>。

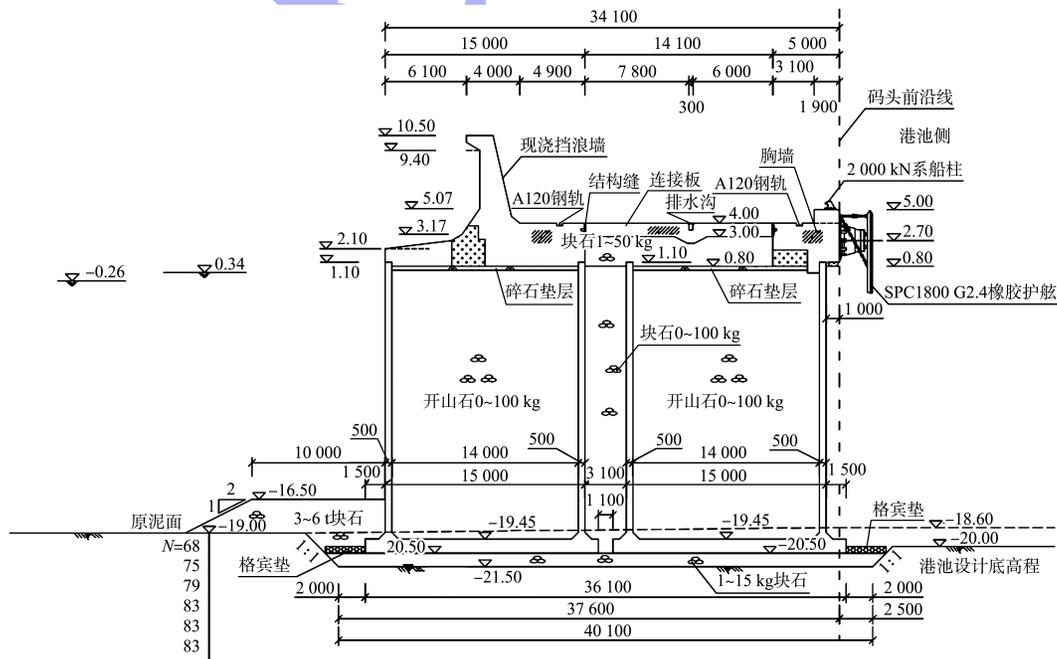
码头区基岩埋藏浅，适合采用重力式结构，

考虑其为突堤式码头，单侧靠泊并兼具防浪功能。相比矩形和四瓣形沉箱方案，双圆筒沉箱方案的单个体积及质量小，对现场施工设备等要求相对较低，有利于减小施工难度和保证施工进度，综合考虑采用直立双圆筒沉箱方案。

方案设有27列共54个圆筒沉箱。圆筒外径15 m，壁厚0.5 m；底板垂直码头前沿方向长17.5 m(前趾长1.5 m、后趾长1.0 m)，底板沿码头前沿方向宽16 m(趾长0.5 m)，底板厚1.05 m；沉箱底高程-20.50 m，顶高程1.10，单个沉箱高21.60 m、质量为1 917 t。沉箱内回填开山石，沉箱外回填10~100 kg块石。沉箱间接缝采用模袋混凝土填充。

码头基床顶高程-20.5 m。码头基床块石在基床厚度小于1.5 m的区段采用1~15 kg块石，基床厚度大于1.5 m的区段采用1~50 kg块石。基床块石不进行强夯处理。码头港侧护底采用0.5 m厚格宾垫，海侧护底采用3~6 t块石。

码头面高程4.0 m，挡浪墙高程10.5~11.5 m。码头上部设置挡浪墙和胸墙，普通段上部中间采用混凝土薄板连接，锚碇段上部采用混凝土厚板连接，见图1。



a) 普通段

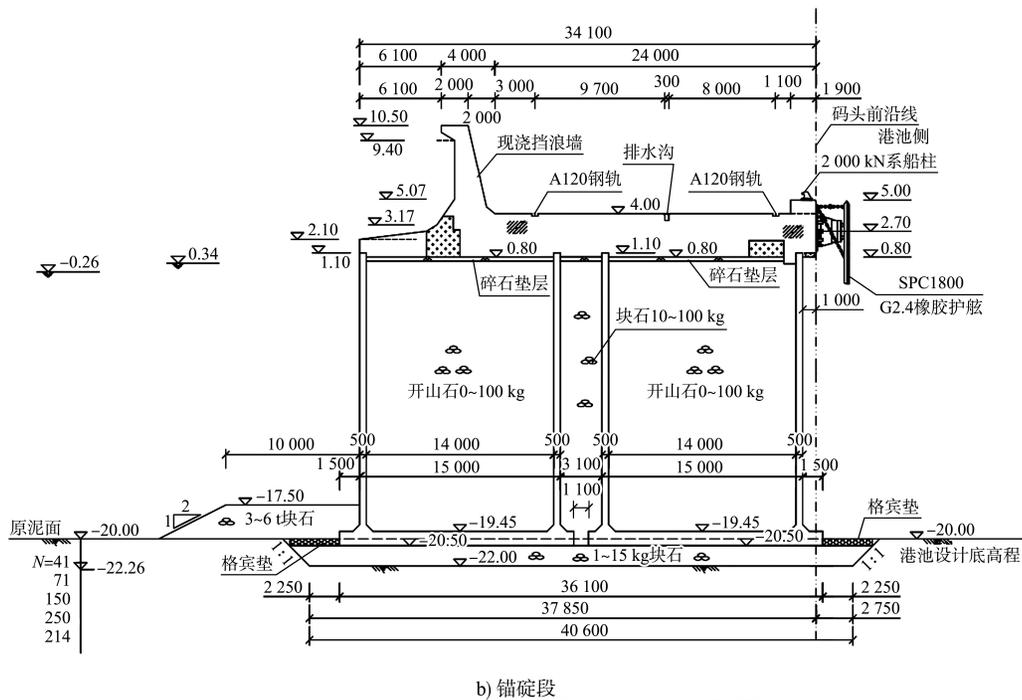


图1 码头断面

## 2 设计要点

### 2.1 码头及挡浪墙高程控制标准

国标中提出,实体结构码头一般可只按上水标准确定码头前沿顶高程<sup>[6]</sup>。规范中未对上水可接受程度予以说明。

项目越浪标准控制主要考虑在码头工作状态下行人和汽车可安全作业,在极端工况下结构不发生破坏。参照 EurOtop 2007 版<sup>[7]</sup>的研究成果,堤后为装卸作业区时,允许越浪量建议为 $\leq 0.42 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ;考虑行人安全及视野等,建议平均越浪量 $\leq 0.1 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。综合考虑,项目越浪量设定为船舶装卸作业期间基本不越浪,平均越浪量 $\leq 0.1 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ;风暴期间(100 a一遇)越浪量 $\leq 50 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

### 2.2 受力特性分析

沉箱结构上部连接考虑2种方式,分别为采用混凝土薄板(1 m厚)与厚板(3.2 m厚)连接,沉箱间和沉箱内均回填块石以增强其稳定性。采用 Abaqus 软件建立模型,结构采用线弹性模型、土体采用摩尔-库仑模型模拟,分析结构变形特性、两排沉箱间的传力特性和基顶应力等。

对于结构变形特点,薄混凝土板方案的两排

沉箱有绕各自后趾倾斜的趋势,而厚混凝土板方案的两排沉箱有保持相对位置不变、共同绕胸墙侧沉箱后趾倾斜的趋势。厚混凝土板方案的结构整体性更好,两排沉箱底板之间的竖向相互错动距离和胸墙顶部水平位移均更小。

对于基顶应力,其最大值出现在胸墙侧沉箱的后趾处。厚混凝土板方案的基顶应力最大值比薄混凝土板方案小,薄混凝土板方案中若在连接板的接缝中填充柔性材料可以减小基顶应力的最大值。

对于薄混凝土板方案,在连接板的接缝中填充柔性材料时,沉箱间填料土压在沉箱高度范围内呈上大下小的分布;不填充柔性材料时则呈上小下大的分布,且连接板会传递超过40%的力矩,使传递的合力矩变大,可能会不利于结构的稳定。

对于厚混凝土板方案,厚板弯矩最大值出现在两排沉箱靠近中央的筒壁内侧附近,剪力最大值出现在两排沉箱中央处,通过适当的配筋可以满足内力的要求。

### 2.3 计算模型

#### 2.3.1 普通段计算模型(薄板连接)

如图2a)所示,普通段连接板两端简化为铰链

约束, 连接板只传递水平力, 不传递弯矩。计算原则如下:

抗滑稳定性:

$$F = Gf \quad (1)$$

式中:  $F$  为抗滑力;  $G$  为海侧与港侧沉箱和中间回填块石的自重力;  $f$  为沉箱与基床块石摩擦系数, 取 0.6。

抗倾稳定性:

$$M_{倾} = M_{稳} \quad (2)$$

式中:  $M_{倾}$  为抗倾覆力矩,  $M_{稳}$  为海侧与港侧沉箱和中间回填块石自重的稳定力矩。倾覆力矩和稳定力矩对各沉箱后趾分别计算。

### 2.3.2 锚碇段计算模型(厚板连接)

锚碇段上部结构采用混凝土厚板连接, 抗滑和抗倾稳定性按照整体考虑。力矩支点均为港侧沉箱后趾, 见图 2b)。

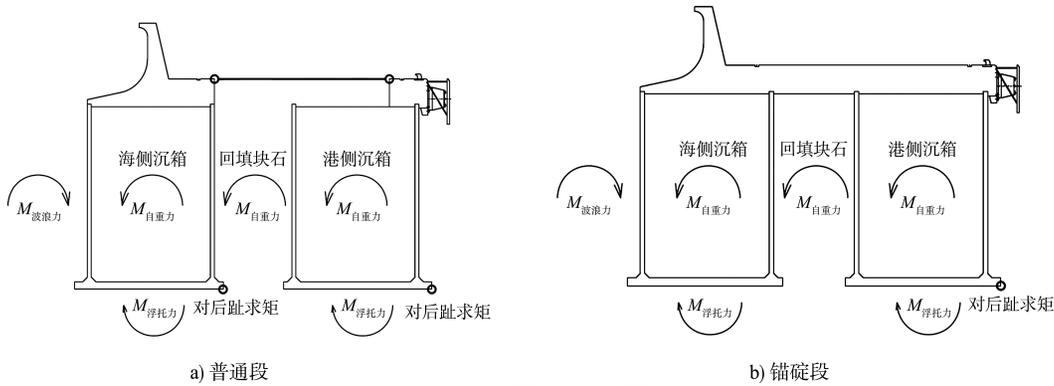


图 2 抗倾稳定性计算模型

### 2.4 沉箱内力分析

采用 ANSYS 软件进行沉箱内力计算, 沉箱筒壁和底板均采用 SHELL43 单元模拟, 对于沉箱与地基之间的作用, 采用受压弹簧 LINK180 进行模拟。针对沉箱的筒壁、底板分别建立独立模型和整体模型, 研究不同建模方式和边界条件对沉箱内力的影响, 确定合理的计算模式。

1) 计算水位(CD 起算)。极端高水位 0.7 m,

极端低水位 -0.6 m, 设计高水位 0.34 m, 设计低水位 -0.26 m。

2) 筒壁计算组合。对比分析正常使用极限状态下的 2 个特征组合: 工况 1: 波吸力+沉箱外土压力+贮仓压力。工况 2: 波峰力+沉箱外土压力+贮仓压力。计算得出竖向弯矩  $M_x$ 、环向弯矩  $M_y$ 、竖向剪力  $F_x$ 、环向剪力  $F_y$ 、竖向轴力  $T_x$  以及环向轴力  $T_y$ , 见表 1。

表 1 筒壁内力结果对比

工况	模型	$M_x / (kN \cdot m \cdot m^{-1})$		$M_y / (kN \cdot m \cdot m^{-1})$		$F_x / kN$	$F_y / kN$	$T_x / kN$	$T_y / kN$
		正弯矩	负弯矩	正弯矩	负弯矩				
1	独立模型	97.9	-94.9	126.2	-126.2	107.7	120.3	1 455.7	690.0
	整体模型	51.6	-15.6	55.6	-55.6	62.8	53.3	569.8	610.5
2	独立模型	87.3	-197.6	108.8	-108.8	256.0	86.6	1 577.8	961.4
	整体模型	98.4	-189.9	110.4	-111.1	240.0	90.3	1 325.0	963.5

由表 1 可知, 向外的负弯矩皆大于向内的正弯矩, 环向张力皆大于竖向张力, 计算结果符合理论实际; 约束筒底和在筒底施加弹簧的 2 种计算方法得到的内力分布大致相同, 均符合实际情

况; 单纯约束筒底的计算方法所得的各项内力结果基本均大于在筒底施加弹簧的计算方法, 因此可以采用单纯约束筒底的计算方法对沉箱的筒壁结构进行简化计算。

3) 底板计算组合。对比分析承载力极限状态的 2 个持久组合: 工况 1: 自重力+贮仓压力+地基反力。工况 2: 自重力+贮仓压力+地基反力+波

浪力。计算得出横向弯矩  $M_v$ 、纵向弯矩  $M_L$ 、横向剪力  $N_x$ 、纵向剪力  $N_y$ , 见表 2。

表 2 底板内力结果对比

工况	模型	$M_v/(kN \cdot m \cdot m^{-1})$		$M_L/(kN \cdot m \cdot m^{-1})$		$N_x/kN$	$N_y/kN$
		正弯矩	负弯矩	正弯矩	负弯矩		
1	独立模型	2 435.6	-1 671.0	2 805.5	-1 692.6	1 617.0	2016.1
	整体模型	2 939.0	-950.4	3 027.8	-2 212.4	1 527.0	2 195.0
2	独立模型	2 542.0	-1 744.8	2 893.6	-1 763.1	1 678.6	2 057.8
	整体模型	3 080.0	-993.1	3 165.8	-2 259.1	1 590.0	2 240.5

由表 2 可知, 底板的弯矩和剪力的梯度分布朝着外荷载作用的方向, 符合理论; 筒壁接触处约束模型和整体约束模型所得的内力分布相似; 筒壁接触处约束的模型比整体约束模型计算所得弯矩大部分都小, 但是向内的负弯矩前者比后者

大, 计算应结合 2 个模型综合考虑。

### 2.5 护底设计

通过研究国内外不同规范关于直立堤护底的计算方法<sup>[8-13]</sup>, 总结出直立堤护底设计推荐的计算方法, 见表 3。

表 3 直立堤护底设计的计算方法

护底计算类型	推荐采用公式	优缺点
与水流相关的护底计算	Bijker (1967) 公式希尔兹准则	被工程界广泛采用
与波浪相关的护底计算	改进的 Tanimoto 公式	被 OCDI、Rock Manual 和美标 CEM 采用
与船舶螺旋桨相关的护底计算	底部流速采用荷兰方法	针对块石计算
	底部流速采用荷兰方法	针对非块石计算, 结果偏于保守
直立堤前护脚块体计算	美标 CEM 图表法	出自 USHIJIMA (1988) 直立堤前护脚块体稳定性验证水槽试验, 波高 $H$ 取值为 $H=1.8H_{1/3}$
雷诺护垫厚度计算	C. T. Brown 设计准则	考虑波浪高度和坡面倾角
	查马克菲尔选型	依据水流流速

项目设计中采用 OCDI 法、CEM 图表法以及国标查图法<sup>[14]</sup>3 种方法理论计算结果与 3D 物模试验<sup>[15]</sup>对比 (表 4), 结果表明, CEM 图表法与 3D 物模试验一致, OCDI 法计算结果偏大, 国标查图法计算块体稳定质量偏小。因此, 直立堤堤前护脚块体稳定质量计算方法推荐采用 CEM 图表法。

### 2.6 减少越浪措施

反弧角结构可以有效降低越浪量, 通常被设立在堤顶处, 也可一定程度上降低堤顶高程, 节省工程造价。

本结构海侧挡浪墙设置在沉箱中部, 挡浪墙底部设置大圆弧结构与沉箱连接, 见图 3。该方案可避免波浪从两圆沉箱间三角区冲击挡浪墙底部, 大浪浪下挡浪墙的波浪力会提供部分稳定力和力矩, 有利于结构安全。计算带反弧角的直立堤的平均越浪量, 结合物模试验结果, 对不同文献、规范中给出的相关计算方法进行分析比较, 结果表明, EurOtop 法适用性广且结果贴近试验值, CEM 法公式简单且结果保守。

表 4 护脚块体稳定质量理论计算值与 3D 物模结果对比

方法	护脚块体 (长×宽×高) / (m×m×m)	护脚块体质量/(t·块 <sup>-1</sup> )
OCDI 法	5.0×2.5×2.0	52.90
CEM 图表法	5.0×2.5×1.6	42.32
国标查图法	2.5×2.5×1.0	13.00
3D 物模试验	5.0×2.5×1.6	42.32

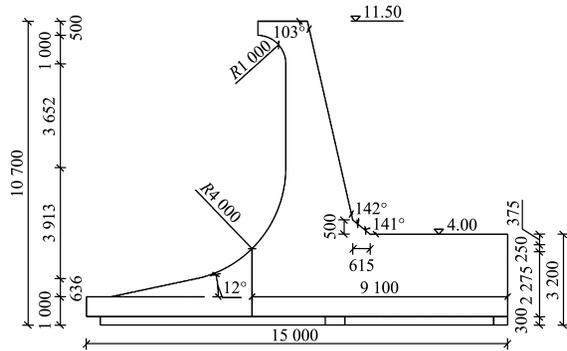


图3 海侧胸墙结构 (尺寸: mm; 高程: m)

### 2.7 堤头保护方案

双圆筒间有较大空隙,在堤头处需进行封堵以防沉箱间填料漏出;同时堤头沉箱受力较堤身更为复杂,两圆筒受向外分离的波浪力。对比研究额外增设沉箱、拉杆连接和钢筋连接沉箱、预制工字块、回填高密度铁矿石方案,综合考虑各方案的可实施性,采用预制工字块方案,同时堤头4个沉箱采用3.2 m厚板连接成整体(图4),确保堤头沉箱的安全。

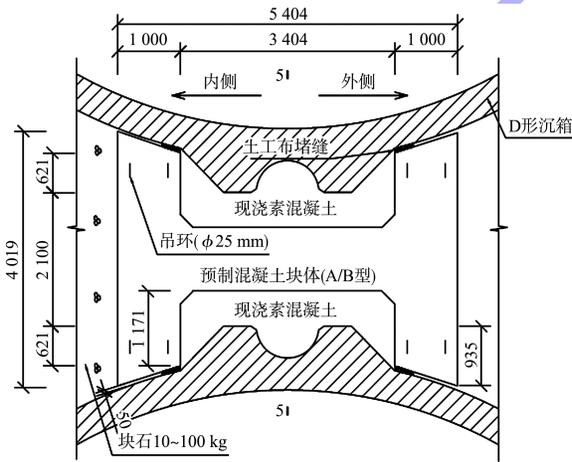


图4 堤头沉箱连接方案 (单位: mm)

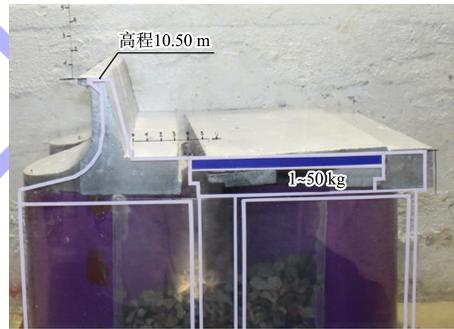
### 2.8 模型验证

设计过程中开展2D和3D物理模型试验。采用2D断面物理模型进行双圆筒沉箱结构整体稳定性试验、沉箱护底稳定性、沉箱越浪量(表5)、沉箱外壁和沉箱底部的波浪压力等试验。试验表明基底断面是稳定的,沉箱在200 a一遇波浪以下都是稳定的。当波高超过10 m时,沉箱上中间的盖板(盖板间未连接)由于强越浪的作用向内侧滑动倚靠在后沉箱上,导致后沉箱产生位移,见图5a)。

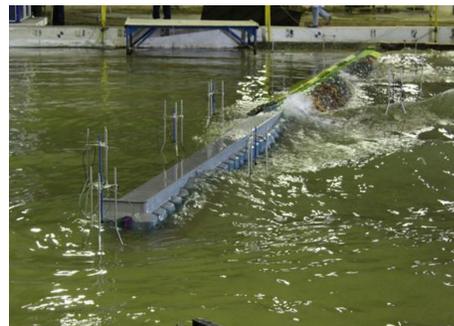
如图5b)所示,3D整体物理模型试验选用N35°和N339°的斜向浪。试验测得的结构整体是稳定的,在圆筒沉箱与斜坡堤连接处的越浪最大,产生有Stem波,需适当提高此位置处挡浪墙的高程并增大防护块体质量。

表5 越浪量2D和3D试验结果

重现期/ a	2D 物模正向浪		3D 物模斜向浪		
	有效波高 $H_s/m$	越浪量 $q/(L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	入射角 $\beta/(^\circ)$	$H_s/l$ m	$q/l$ $(L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
2	3.99	0	339	3.98	0
5	5.12	0.44	339	5.00	-
10	5.97	2.22	339	5.76	0.53
20	6.85	19.77	339	6.53	-
50	8.06	111.67	339	7.65	-
100	8.80	172.78	339	8.37	32.50
200	9.58	556.14	339	9.30	-



a) 2D



b) 3D

图5 物模试验

### 3 结语

- 1) 防波堤和码头一体的双圆筒沉箱结构采用双排圆筒沉箱并排布置,是在同等既需要满足船舶靠泊作业又需满足防浪要求下的创新结构。
- 2) 提出实体结构码头船舶装卸作业期间基本

不越浪、平均越浪量 $\leq 0.1 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 风暴期间(100 a一遇)越浪量 $\leq 50 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 的高程控制标准;并就双圆筒沉箱结构上部结构连接方式、受力特性、计算模型、内力计算进行介绍。

3) 直立堤护底设计的计算方法推荐采用CEM图表法。

4) 提出将海侧挡浪墙设置在圆沉箱的中部并设置反弧角的断面结构以有效降低越浪量;采用预制工字块封堵沉箱间填料,并在堤头4个沉箱采用厚板连接成整体的设计方法。

5) 通过开展2D和3D物理模型试验验证整体设计方案可行。

#### 参考文献:

- [1] 石兴勇.一种兼具防波堤功能的双圆筒沉箱码头结构:CN202121567171.4[P].2021-11-23.
- [2] 河海大学.一种兼做码头和防波堤的沉箱结构:CN201720700909.7[P].2018-01-16.
- [3] DANG B L, NGUYEN-XUAN H, WAHAB MA. Numerical study on wave forces and overtopping over various seawall structure using advanced SPH-based method [J]. Engineering structures, 2021, 226(1): 111349. 1-111349. 9.
- [4] VAN GENT M RA. Influence of oblique wave attack on wave overtopping at caisson breakwaters with sea and swell conditions [J]. Coastal engineering, 2021, 164 (3): 103834. 1-103834. 15.
- [5] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.阿尔及利亚Bethioua 矿石码头项目详细设计[R].广州:中交第四航务工程勘察设计院有限公司,2017.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司,中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港总体设计规范:JTS 165—

- 2013[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [7] The EurOtop Team. EurOtop-Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual [M]. London: EurOtop, 2007.
- [8] Construction Industry Research and Information Association. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering [M]. London: CIRIA Special Publication, 1991.
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan [M]. Tokyo: OCDI, 2009.
- [10] US Army Corps of Engineers. Shore Protection Manual [M]. 4th ed. Washington DC: Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [11] CIRIA, CUR, CETMEF. The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering [M]. 2nd ed. London: CIRIA C683, 2006.
- [12] 高超,陈旭达.船舶螺旋桨作用下直立式码头的护底流速计算[J].水运工程,2017(7):82-86.
- [13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤与护岸设计规范:JTS 154—2018[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [14] Laboratoire d'Etudes Maritimes. Project D'etude et construction du poste mineralier al'est du port de bethioua mission 04: Étude d'agitation et de stabilité en bassin a houle (3D) [R]. Algeria: Laboratoire d'Etudes Maritimes, 2017.
- [15] Laboratoire d'Etudes Maritimes. Project D'etude et construction du poste mineralier al'est du port de bethioua mission 3. 1: Etude sur modèle réduit physique En canal a houle sur la digue verticale [R]. Algeria: Laboratoire d'Etudes Maritimes, 2017.

(本文编辑 王传瑜)

## · 消 息 ·

### 湖北黄石港棋盘州港区棋盘洲作业区三期陆域堆场项目交工验收

近日,二航局承建的湖北黄石港棋盘州港区棋盘洲作业区三期陆域堆场项目交工验收。该项目位于黄石市阳新县,主要建设内容包括新建4个通用泊位和4个散货泊位、8条堆场道路、10座生产办公楼。该项目建成后,将大幅提升区域航运能力,优化全省港口布局,完善鄂东港口集疏运体系。

[https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202409/t20240902\\_215859.html](https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202409/t20240902_215859.html) (2024-08-15)