

大型椭圆沉箱结构侧壁内力计算

刘 强, 张馨竹, 任增金

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对预制椭圆沉箱持续大型化引起的波浪荷载计算超出规范问题, 对设计椭圆沉箱结构进行圆形墩柱等效简化研究, 采用规范计算圆形墩柱简化结构波浪荷载与椭圆沉箱码头最大水平总波浪力及波压强的物理模型试验结果进行对比的方法, 可以判断结构简化的合理性, 进而对椭圆沉箱侧壁波压强设计取值进行合理选择。依据相关规范公式对椭圆沉箱侧壁内力进行计算, 并与采用有限元软件计算的结果进行对比与验证, 得出椭圆沉箱侧壁由波浪引起的内力的准确计算结果, 为类似工程设计提供借鉴。

关键词: 墩式码头; 椭圆沉箱; 结构内力

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S1-0052-06

Calculation of structural internal force of exterior wall for large-scale elliptical caisson

LIU Qiang, ZHANG Xin-zhu, REN Zeng-jin

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In view of the problem that the calculated wave load exceeds that stipulated in the codes caused by the continuous enlargement of the prefabricated elliptical caisson, we carry out a research on the equivalent simplification of the circular pier column for the design of the elliptical caisson structure. Comparing the code calculation results of the circular pier column and the physical model test value of the total horizontal wave force and the wave pressure on the elliptical caisson, we can judge the rationality of the structure simplification and then choose a reasonable design value of the wave pressure on the exterior wall. Comparing and verifying the calculation results based on relevant codes with those by finite element software, we obtain the accurate calculation results of the internal forces caused by waves on the exterior wall of the elliptical caisson, which may serve as reference for similar engineering designs.

Keywords: pier wharf; elliptical caisson; structural internal force

1 工程概况

1.1 工程规模

青岛港董家口港区青岛港集团矿石码头工程建设规模为 1 个 30 万吨级兼顾 38.8 万 t 散货船的铁矿石进口泊位和 1 个 10 万吨级的散货出口泊位(远期兼顾 15 万吨级散货船停靠), 并配套

建设相应的引桥、引堤和护岸等。其中 30 万吨级泊位按 40 万 t 矿石专用卸船泊位设计, 采用的超大椭圆墩式沉箱单个质量 6 020 t, 为外海开敞式“一”字形布置, 码头总长度 510 m, 码头面宽 40 m, 顶面高程 13.5 m, 前沿底高程 -25 m (图 1)。

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 刘强(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口水工结构设计。

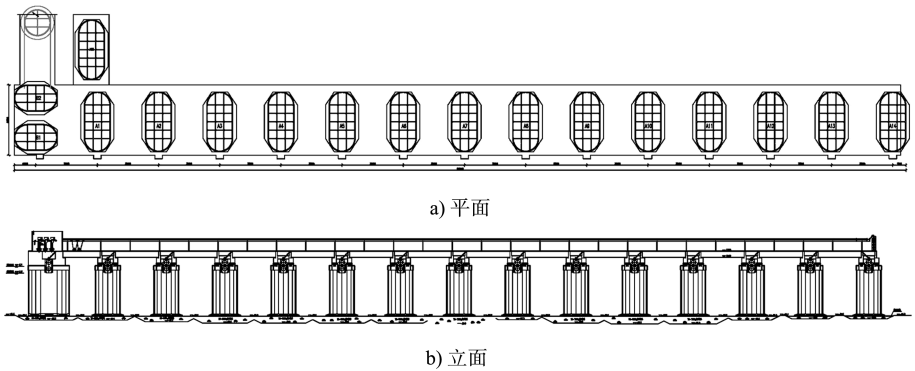


图 1 码头沉箱排列

1.2 自然条件

1.2.1 设计水位

设计高水位为 4.71 m，设计低水位为 0.67 m，极端高水位为 5.91 m，极端低水位为-0.45 m。

1.2.2 设计波浪

本海区实测海浪是多以涌浪为主的风涌混合浪，码头前沿设计波要素见表 1。

表 1 设计高水位时 30 万吨级卸船泊位码头前沿设计波要素

| 重现期/a | 波向 | $H_{1\%}/\text{m}$ | $H_{4\%}/\text{m}$ | $H_{5\%}/\text{m}$ | $H_{13\%}/\text{m}$ | \bar{T}/s |
|-------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 50 | E—ESE | 7.0 | 6.0 | 5.8 | 4.9 | 8.9 |
| | SE—SSE | 7.2 | 6.1 | 5.9 | 5.0 | 8.9 |
| | S—SSW | 5.3 | 4.5 | 4.4 | 3.6 | 7.5 |

1.2.3 水流

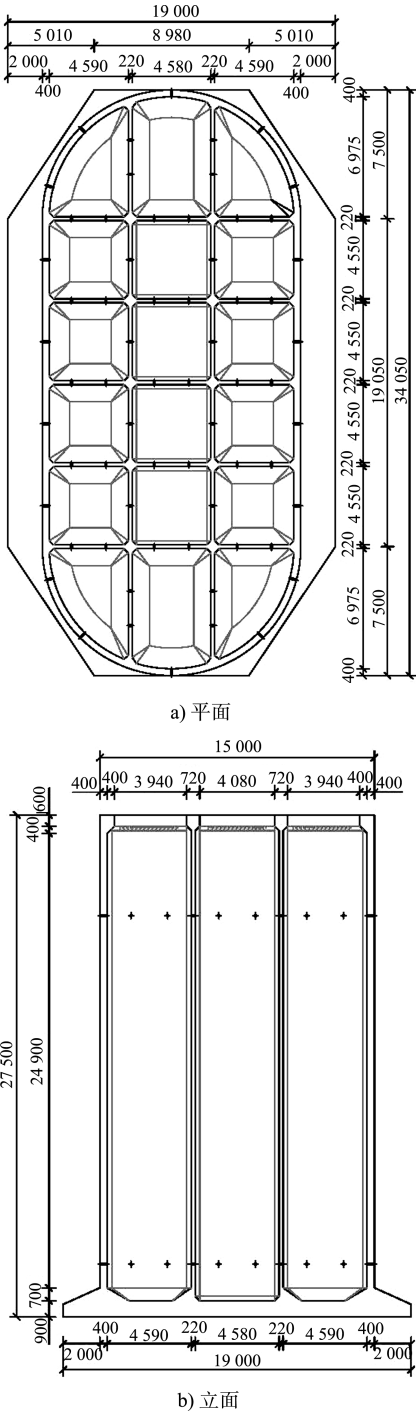
最大涨潮流流速 0.67~1.07 m/s，最大落潮流流速 0.48~0.89 m/s。本工程 30 万吨级码头前沿设计流速 1.5 m/s，流向 56°~72°。

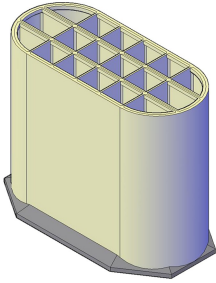
1.2.4 工程地质

工程区域土层分布较为均匀，自上而下依次为淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉土、中粗砂、全风化花岗岩及强风化花岗岩。强风化花岗岩分布连续、稳定，强度高，为重力式码头结构良好的基础持力层。

1.3 码头主体结构

码头采用重力墩式椭圆沉箱结构，沉箱主尺度为 34.05 m×15.00 m(不含趾)×27.50 m(长×两端圆弧直径×高)，长度方向不设趾，宽度方向趾长 2 m，单个沉箱质量 6 020 t。沉箱顶高程 2.50 m，底高程-25.00 m，沉箱内回填块石(图 2)。





c) 沉箱三维示意

图 2 沉箱结构 (单位: mm)

2 研究思路

重点研究沉箱侧壁的波浪荷载和内力计算。影响沉箱侧壁内力的主要因素之一是波浪压强,《港口与航道水文规范》^[1]明确给出波浪对直墙式建筑物和对圆形墩柱建筑物的计算公式,但受限于波浪要素与建筑物外形轮廓的制约因素,计算公式往往存在一定的限制性条件,对于超出限制性条件范围的情况,规范并未给出明确说明。因此,重点从以下 2 点进行研究:

- 1)对设计椭圆沉箱结构进行圆形墩柱等效简化,以便利用《港口与航道水文规范》进行计算;
- 2)通过计算出的结构最大水平总波浪力与物理模型试验水平总波浪力的对比,验证计算结构简化的合理性;
- 3)对简化的圆形墩柱进行波压强计算,通过与物理模型试验波压强进行对比,进一步验证计算结构简化的合理性;
- 4)根据《码头结构设计规范》^[2]公式对椭圆沉箱壁进行波压强下的内力计算,并与 Staad 二维模型和 Midas 三维模型有限元软件计算结果进行对比,以确定计算结果的准确性。

3 波浪荷载计算

3.1 规范选择

本项目码头结构呈“一”字形墩式布置,E 向为波浪常浪向,且在 E 向波入射条件下,椭圆沉箱结构垂直波浪入射的受力面更大,自重力的稳定力臂更小,因此 E 向波浪入射条件为相对危险的设计状态。物理模型试验平面布置及椭圆沉箱受力坐标系分别见图 3、4。本文以非工作状态下波浪要素作为输入条件,根据《港口与航道水文规范》相关条款,计算输入及输出结果(表 2)。

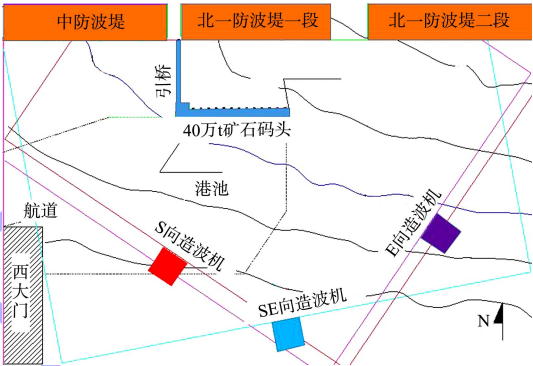


图 3 物理模型试验平面布置

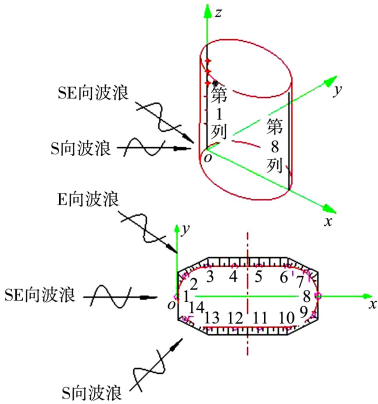


图 4 椭圆沉箱受力坐标系

表 2 墩柱体适用规范公式的选择

| 水位/m | 设计波要素 $H_{1\%}/\text{m}$ | 波浪周期 T/s | 码头前沿水深 d/m | 深水波长 L_0/m | 基床上水深 d_1/m | 设计波长 L/m | 垂直波向 b/m | 平行波向 a/m | b/L | a/b | d_1/d | $1.7H$ |
|-------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|---------|--------|
| 极端高水位 5.91 | 7.00 | 8.9 | 30.9 | 124 | 30.9 | 115 | 30.8 | 25.6 | 0.27 | 0.83 | 1 | 11.9 |
| 设计高水位 4.71 | 7.00 | 8.9 | 29.7 | 124 | 29.7 | 114 | 30.8 | 25.6 | 0.27 | 0.83 | 1 | 11.9 |
| 设计低水位 0.67 | 6.79 | 8.9 | 25.7 | 124 | 25.7 | 110 | 30.8 | 25.6 | 0.28 | 0.83 | 1 | 11.5 |
| 极端低水位 -0.45 | 6.69 | 8.9 | 24.6 | 124 | 24.6 | 109 | 30.8 | 25.6 | 0.28 | 0.83 | 1 | 11.4 |
| 备注 | - | - | - | - | - | - | - | - | 计算条件① | 计算条件② | 计算条件③ | 计算条件④ |

注: 1) 计算条件①: 满足《港口与航道水文规范》10.3.6 条款规定, D/L 或 $b/L > 0.2$ 时为大尺度墩(柱)体。按大尺度墩柱计算;
2) 计算条件②: 满足《港口与航道水文规范》10.3.6.2 条规定, $a/b \leq 1.5$ 的大尺度矩形体波浪力可按附录 R 确定。
3) 计算条件①③④: 满足《港口与航道水文规范》附录 R.0.1.2 的规定, $0.2b/L \leq 0.9$, $d_1/d > 2/3$ 且 $d_1 > 1.7$ 时, 波浪力可按折算直径 D 按条款 10.3.6 条进行计算, 折算直径 $D = (4ab/\pi)^{0.5}$, 等效折算直径 $D = 25.5 \text{ m}$ 。

3.2 波浪力计算结果与试验结果对比

根据《青岛港董家口 40 万吨级矿石码头工程波浪整体物理模型试验研究报告》^[3], 给出各水位情况下最大总水平力和最大总浮托力(图 5), 并与《港口与航道水文规范》10.3.6 条款公式按照等效直径为 25.5 m 圆沉箱的计算结果进行对比(表 3)。



图 5 E 向波浪对椭圆沉箱结构的作用

表 3 总水平力和总浮托力的计算结果与试验结果对比

| 计算水位 | 总水平力/kN | | | 总浮托力/kN | | |
|-------|---------|--------|------|---------|-------|------|
| | 计算结果 | 试验结果 | 误差/% | 计算结果 | 试验结果 | 误差/% |
| 极端高水位 | 48 652 | 46 171 | 5 | 6 900 | 7 537 | 9 |
| 设计高水位 | 46 517 | 42 383 | 9 | 6 433 | 6 800 | 6 |
| 设计低水位 | 44 641 | 40 631 | 9 | 5 716 | 6 299 | 10 |
| 极端低水位 | 43 706 | 39 468 | 10 | 5 293 | 5 774 | 9 |

从表 3 可知: 总水平力和总浮托力的计算结果与试验结果对比的误差都控制在 10% 以内, 椭圆沉箱结构进行圆形墩柱等效简化理论计算的结果基本满足误差要求, 并且将通过沉箱壁的压强计算进一步验证结构简化的合理性。

3.3 波压强计算结果与试验结果对比

根据《青岛港董家口 40 万吨级矿石码头工程波浪整体物理模型试验研究报告》, 波压强的测定通过在重力墩的立面和底面布置点压力传感器来进行, 数据通过 SG2000 型数据采集系统采集。试验时在静水条件下, 对所有测点标零, 在静水面以下的测点以此时的静水压强作为对应测点的零点, 在静水面以上的测点以此时的大气压强作为零点。试验采集到的压强值为测点实际压强与标零时测点对应压强的差值, 亦即所受到的波浪动水压强。椭圆沉箱码头压力测点布置见图 6。

试验给出各水位情况下点压强测试结果, 并与《港口与航道水文规范》关于等效直径为 25.5 m 圆沉箱的计算结果进行对比(表 4)。

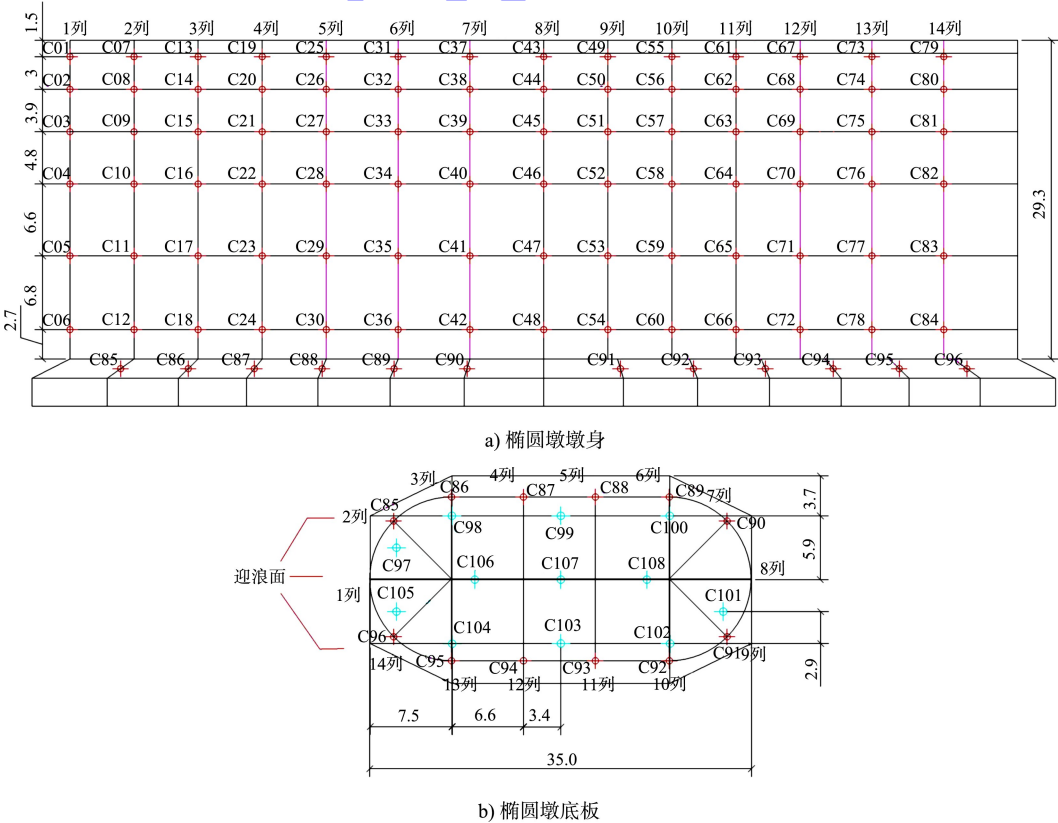


图 6 码头椭圆沉箱压力测点布置 (单位: m)

表 4 椭圆沉箱侧壁压强计算结果与试验结果对比

| 水位 | 椭圆沉箱侧壁压强/kPa | | | | | | | | | |
|-------|--------------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Z=4.3 m | | Z=11.1 m | | Z=17.7 m | | Z=22.5 m | | Z=26.4 m | |
| | 计算值 | 试验值 | 计算值 | 试验值 | 计算值 | 试验值 | 计算值 | 试验值 | 计算值 | 试验值 |
| 极端高水位 | 24 | C24=28 | 28 | C05=32 | 32 | C22=36 | 40 | C27=39 | 52 | C68=45 |
| 设计高水位 | 26 | C12=28 | 30 | C23=32 | 36 | C22=35 | 44 | C15=41 | 56 | C20=47 |
| 设计低水位 | 29 | C72=27 | 34 | C65=31 | 42 | C58=38 | 50 | C63=45 | 67 | C56=60 |
| 极端低水位 | 30 | C72=25 | 36 | C71=28 | 44 | C64=37 | 53 | C69=47 | - | C68=62 |

注：Z 为计算点与底的距离。

从表 3 可得如下结论：

1)沉箱底高程-25 m，沉箱顶高程 2.5 m，极端低水位-0.45 m，设计波要素 $H_{1\%}=6.69\text{ m}$ ，根据《港口与航道水文规范》波压强计算水面深度为 $d+(\eta_{\max}-H/2)=25.6\text{ m}(<26.4\text{ m})$ ，因此表 4 中极端低水位对应的 $Z=26.4\text{ m}$ 处“-”代表无理论计算值。

2)表中试验值为在同一计算水位条件下，对应不同计算深度 Z 的环向最大波压强取值。同一水位情况下，随着 Z 值增加，最大波压强变大，符合《港口与航道水文规范》中关于墩柱上波浪力的分布规律。

3)通过计算值与试验值的对比可知，虽然公式计算与物理模型试验的结果存在一定的差别，但非常接近，试验值整体略小于计算值，尤其是在 Z 值较大的情况下 ($Z=22.5、26.4\text{ m}$)。这主要是因为极端高水位和设计高水位条件下，波压强计算水面高于沉箱顶高程，且上部结构为透空结构，造成波浪面上部越浪，并未全部作用在沉箱墩上。

4 波浪力引起的沉箱壁内力计算

在波压强标准值的选取上，因计算值与试验值结果十分接近，出于使结构更偏于安全考虑，取计算值与试验值中较大值作为计算荷载，本文取 $P=C68=62\text{ kPa}$ 作为波压强的标准值进行由波浪力引起的沉箱壁结构内力计算。结构内力计算将根据《码头结构设计规范》、Staad 二维模型和 Midas 三维模型计算结果进行对比，以确定计算结果的准确性。

4.1 公式法

针对椭圆沉箱的计算，可将椭圆沉箱分为方形沉箱和圆形沉箱。

关于方形沉箱，《码头结构设计规范》规定：1)底板以上 1.5 倍内隔墙间距区段，按三边固定一边简支板计算；2)1.5 倍内隔墙间距以上区段，多于两跨时按两端固定的连续板计算；等于或少于两跨时按框架或两端固定的单跨板计算；3)隔墙与外壁的连接按轴心受拉构件计算，当相邻箱格填料顶面高差大于 1 m 时，隔墙按轴心受拉构件和偏心受拉构件计算。

关于圆形沉箱，现行的行业设计规范并未给出明确的规定，但原《重力式码头设计与施工规范》(已废止)附录 H 给出了圆形沉箱外壁均布荷载下的环向内力计算公式(H.0.3-11~H.0.3-18)。

此规范虽然在 2018 年已经废止，但后续行业规范并未给出明确的计算公式，一般是按照有限元进行计算，但从规范计算的角度，《重力式码头设计与施工规范》(已废止)附录 H 仍具有很高的参考价值。

4.2 有限元法

对于 Staad 二维模型，将波压强均匀作用在沉箱侧壁外围单宽为 1 m 的范围内，进行沉箱侧壁内力的有限元计算，结果见图 7。

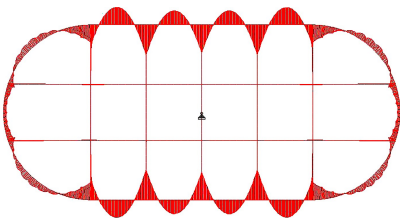


图 7 Staad 二维模型计算

对于 Midas 三维模型，按照表 4 的波压强高度分布，将波压强荷载作用在椭圆沉箱侧壁进行内力的有限元计算，结果见图 8。

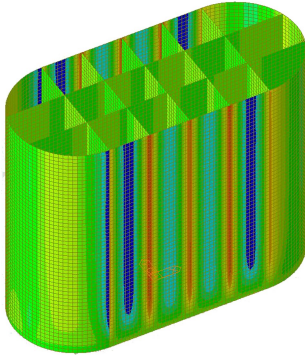


图 8 Midas 二维模型计算

4.3 计算结果对比

在相同波压强条件下，根据规范公式计算、Staad 二维模型、Midas 三维模型，对比沉箱侧壁由于波压强引起的内力计算结果(表 5)。

| 表 5 椭圆沉箱侧壁波压强引起内力设计值计算结果对比 | | | | | |
|----------------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------|------------|
| 箱型 | 计算方法 | 跨中力距/ (kN·m) | 支座力距/ (kN·m) | 剪力/ kN | 轴向力/ kN |
| 方形 沉箱 | 公式计算 | 132 | 264 | 332 | - |
| | Staad 二维模型 | 160 | 281 | 351 | 959 |
| | Midas 三维模型 | 165 | 286 | 332 | 1 005 |
| 椭圆 沉箱 | 公式计算 | 49 | 162 | - | 1 073 |
| | Staad 二维模型 | 63 | 178 | 138 | 961 |
| | Midas 三维模型 | 68 | 194 | 332 | 1 004 |

5 结论

1)对椭圆沉箱结构进行圆形墩柱等效简化，以便符合利用现行行业规范进行理论计算。通过与物理模型试验结果进行对比可知，总波浪力、波压强等计算结果与试验结果差别不大，证明椭圆沉箱结构简化合理。

2)尽管《重力式码头设计与施工规范》已废止，但通过采用公式计算与 Staad 二维模型和 Midas 三维模型建模计算结果对比可知，3 种方法计算的沉箱侧壁内力结果十分接近，证明椭圆沉箱侧壁内力的计算可以采用公式计算与有限元计算相互比选。

参考文献：

[1] 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.

[2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 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] 交通部天津水运工程科学研究所. 青岛港董家口 40 万吨级矿石码头工程波浪整体物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2009.

[4] 中交第四航务工程局有限公司. 重力式码头设计与施工规范: JTS 167-2—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 51 页)

参考文献：

[1] 宋神友, 聂建国, 徐国平, 等. 双钢板-混凝土组合结构在沉管隧道中的发展与应用[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 109-120.

[2] 汪伟. 一种基于液压小车的移船系统[J]. 科技创新与应用, 2017(20): 45-46.

[3] 孙瑞雪, 高真所, 窦钧. 平地造船技术浅析[C]//史殿敏, 郭程新. 2008 中国大连国际海事论坛论文集. 大连: 大

连海事大学出版社, 2009: 49-52.

[4] 葛前平. 平地造船拉移下水方案研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.

[5] 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.

(本文编辑 王璁)