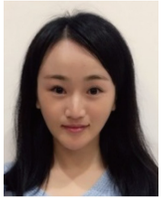


滚装码头护底结构设计

蒋美娇，李春保
（中交四航局港湾工程设计院有限公司，广东 广州 510290）

摘要：直墙式码头前沿护底结构的设置是确保码头主体结构整体安全稳定性的重要措施之一，墙前波浪底流和船舶螺旋桨射流扰动冲刷作用是护底结构设计考虑的两大主要因素。目前，我国现行水运工程设计规范对墙前波浪底流冲刷的护底结构设计思路与方法较为全面，但对于船舶螺旋桨射流引起的冲刷计算及护底结构设计缺少明确的计算方法。对比分析国内外规范关于直墙式码头前沿护底结构设计方面的差异，结合工程实例进行了验算，并与实际检测情况进行对比，说明了滚装码头船舶螺旋桨射流冲刷对基床破坏的严重性及护底结构设计的重要性，以供相关规范标准修订参考。

关键词：护底结构；底流速；螺旋桨射流；冲刷
中图分类号：U656.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)02-0089-05

Design of bottom protection structure of ro-ro wharf

JIANG Meijiao, LI Chunbao
(Engineering Design Institute Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: It is one of the important measures to ensure the overall safety and stability of the main structure of the straight wall wharf, the wave bottom current in front of the wall and the disturbing and scouring action of the propeller jet are two main factors considered in the design of the bottom protection structure. At present, the current design code for water transport engineering in China is comprehensive in the design ideas and methods of bottom protection structure with wave bottom current scouring in front of the wall. However, there is a lack of explicit calculation method for the scour caused by propeller jet and the design of bottom protection structure. This paper compares and analyzes the differences in the design of the front bottom protection structure of the straight wall wharf between the domestic and foreign codes, verifies them with engineering examples, and compares them with actual testing results. It explains the severity of the damage to the foundation bed caused by the jet erosion of the ship propeller in the ro-ro wharf and the importance of the bottom protection structure design, providing reference for the revision of relevant standards and regulations.

Keywords: bottom protection structure; bottom flow velocity; propeller jet; scour

在直墙式码头结构设计中，为防止墙前底部受到水流冲刷引起结构失稳，常需设置护底结构。墙前波浪引起的底流冲刷和船舶螺旋桨射流扰动冲刷是护底结构设计需要考虑的 2 个主要影响因素。

关于直墙式码头前沿波浪底流作用下的护底结构设计，目前国内规范可参照 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》[1]，护底块石的稳定质量由堤前波浪底流速确定，根据堤前最大波浪底流速查表确定堤前护底块石的稳定质量。国外规范主要参照手册 *The Rock Manual*[2] 进行波浪底流作用下的护底结构设计。其中介绍了直墙建筑物在波浪的作用下，护底块石的设计思路和方法，根据公式计算护底块石的名义中值粒径，再根据

收稿日期：2024-04-09

作者简介：蒋美娇（1987—），女，高级工程师，从事水运工程咨询、设计工作。

水运工程

转换关系式可得护底块石的中值粒径和中值质量。

关于船舶螺旋桨射流扰动冲刷作用下的护底结构设计，学者们已做过类似研究[3-5]，但目前国内尚无现行规范可参考。国标 JTS 165-6—2008《滚装码头设计规范》[6]考虑了螺旋桨产生的射流中心速度对码头护底结构的影响，并给出射流中心速度计算公式，根据射流中心速度查表确定块石稳定质量。目前上述规范已被现行 JTS 165—2013《海港总体设计规范》[7]所替代，而现行规范中没有关于船舶螺旋桨射流扰动对码头护底结构稳定影响的相关内容。在国外相关计算方法中，当考虑船舶螺旋桨射流扰动影响为主要影响因素时，常参考国际航运协会 PIANC 设计手册 *Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships*[8]，根据码头结构形式、靠泊的船舶类型、螺旋桨参数及靠泊方式等因素，采用不同的冲刷流速计算公式。手册中提到的荷兰方法和德国方法均基于独立的研究理论，二者的螺旋桨初始射流流速计算方法相同，差异主要体现在后续最大冲刷流速的计算方法上，荷兰方法基于块石类的护底结构计算，适用于计算冲刷条件下块石的稳定质量；德国方法考虑的影响因素较多，计算参数选取较为复杂。对比之下，当考虑船体尾部主螺旋桨冲刷时，荷兰方法冲刷流速计算方法应用更为广泛。

1 螺旋桨射流作用下的护底结构设计

1.1 国外规范和文献的计算方法

PIANC 设计手册中结合码头结构形式、码头前沿水底土质以及拟靠船舶螺旋桨类型和靠泊方式，分析了船舶靠岸时螺旋桨扰动对水底的冲刷作用，其计算思路是根据船舶主螺旋桨或侧推进器的功率，计算初始射流流速，结合码头结构形式，计算前沿冲刷流速，进而确定护底块石粒径。

在主螺旋桨作用下的初始射流流速 $v_{0,\mathrm{main}}$，按下式计算：

$$v_{0,\mathrm{main}} = c_3 \left(\frac{f_{\mathrm{P}} P_{\mathrm{D}}}{\rho_{\mathrm{w}} D_{\mathrm{P}}^2} \right)^{0.33} \tag{1}$$

根据初始射流流速计算结果，采用荷兰方法计算最大冲刷流速 $v_{b,\max}$，公式为：

$$v_{\mathrm{b,max}} = (0.2 \sim 0.3)\, v_{0,\mathrm{main}} \left(\frac{D_{\mathrm{P}}}{h_{\mathrm{P}}} \right) \tag{2}$$

根据冲刷流速计算结果，采用荷兰方法计算护底块石粒径 D_{50}，公式为：

$$\Delta D_{50} = \frac{v_{\mathrm{b,max}}^2}{B_{\mathrm{crit.\,Iz}}^2 2g} \tag{3}$$

式中：c_3 为经验参数，有管道的螺旋桨取 1.17，无管道时取 1.48；f_{P} 为发动机功率所占百分比；P_{D} 为主螺旋桨功率；ρ_{w} 为海水密度；D_{P} 为主螺旋桨桨径；h_{P} 为主螺旋桨距护底的距离；Δ 为块石相对密度，取 1.65；$B_{\mathrm{crit.\,Iz}}$ 为计算参数(可查表)；g 为重力加速度。

1.2 国内规范的计算方法

JTS 165-6—2008《滚装码头设计规范》中，考虑了螺旋桨产生的射流对码头墙前护底结构的稳定性计算，根据以下公式确定射流流速 U_0 为：

$$U_0 = c \left(\xi \frac{P_{\mathrm{d}}}{D_{\mathrm{P}}^2} \right)^{1/3} \tag{4}$$

式中：c 为关于螺旋桨的系数，无导流管时取 1.48，有导流管时取 1.17；ξ 为离泊时启用的功率百分比；P_{d} 为船舶装机总功率；D_{P} 为螺旋桨直径。

根据表 1 确定护底块石稳定质量。

表 1 护底块石的稳定质量

Tab. 1 Stable weight of apron rock

射流中心速度/(m·s^{-1})	2.0	3.0	4.0	5.0
块石稳定质量/kg	60	150	400	800

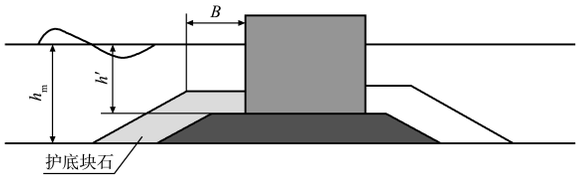
2 波浪底流作用下的护底结构设计

2.1 国外手册的计算方法

当考虑波浪水流为主要影响因素时，主要参照 *The Rock Manual* 进行波浪底流作用下的护底结构计算。其中介绍了直墙建筑物在波浪的作用下护底块石的设计思路和方法，护底结构设置形式与范围见图 1，计算公式见(5)。

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}}=\left(5.8\frac{h'}{h_m}-0.6\right)N_{od}^{0.19} \tag{5}$$

式中：H_s 为设计波高；Δ 为块石相对密度，取 1.65；D_{n50} 为块石名义中值直径；N_{od} 为破坏系数，几乎无损坏，取 0.5，部分损坏，取 2.0。



注：B 为护底宽度。H_m 为港池水深，h'为墙前基床顶水深。

图 1　护底结构截面

Fig. 1　Cross-section for apron protection

根据 *The Rock Manual* 中的转换关系式可以得到护底块石的中值粒径和中值质量：

$$D=D_{n50}=\sqrt[3]{\frac{M_{50}}{\rho_s}}\text{或 }D_{n50}\cong 0.84D_{50} \tag{6}$$

式中：D 为护底厚度；D_{50} 为护底块石中值粒径；M_{50} 为护底块石中值质量；ρ_s 为块石密度。

根据式(5)可计算出块石名义中值直径，再根据式(6)换算出块石中值质量。

2.2　国内规范的计算方法

直墙式码头前沿波浪底流作用下护底结构设计，可参照 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》中的 5.3.17 条，护底块石的稳定质量由堤前波浪底流速确定，直墙式结构按照墙前波浪形态不同，波浪底流速 v 计算公式有所不同。

立波：
$$v=\frac{2\pi H}{\sqrt{\frac{\pi L}{g}\sinh\frac{4\pi d}{L}}} \tag{7}$$

远破波：
$$v=0.33\sqrt{g(H+d)} \tag{8}$$

近破波：
$$v=\frac{\pi H}{\sqrt{\frac{\pi L}{g}\sinh\frac{4\pi d}{L}}} \tag{9}$$

式中：H 为设计波高；L 为计算波长；d 为堤前水深。

根据表 2 确定堤前护底块石的稳定质量。

表 2　堤前护底块石的稳定质量

Tab. 2　Stable weight of apron rock in front of breakwater

堤前最大波浪底流速/(m·s^{-1})	2.0~2.5	2.6~3.0	3.1~3.5	3.6~4.0	4.1~4.5	4.6~5.0
护底块石稳定质量/kg	60~100	100~200	200~300	300~400	400~600	600~800

3　工程实例

3.1　工程概况

国内某海港客货滚装码头，项目共建设 18 个 1 万吨级客货滚装泊位，码头主体均采用直墙重力式结构，分两期建设，一期于 2017 年建成投产、建设 1#~10#泊位，二期于 2019 年建成投产、建设 11#~18#泊位，码头泊位平面布置见图 2。

设计船型为 1 万 GT 客货滚装船，尾跳板接岸，船长 127 m、宽 20.5 m、深 13.7 m，最大吃水 6.3 m，船舶自航进出港，无拖轮辅助，船舶靠离泊启用功率 20%。主螺旋桨功率 2×2 040 kW，主螺旋桨直径 2.9 m、桨间距 6.8 m、主机转速 800 r/min，螺旋桨主轴离港池底最小距离 2.6 m。

码头前沿设计波浪为 WSW 向，波高 $H_1\%$ = 2.76 m、$H_5\%$ = 2.28 m、$H_{13}\%$ = 1.92 m，波长 L = 72.4 m，周期 T = 7.9 s。

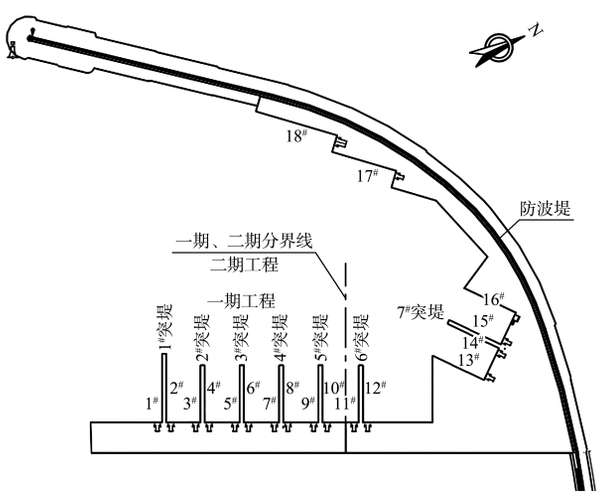
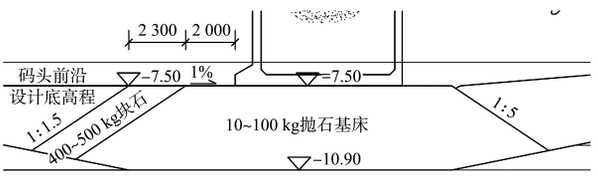


图 2　码头泊位平面布置

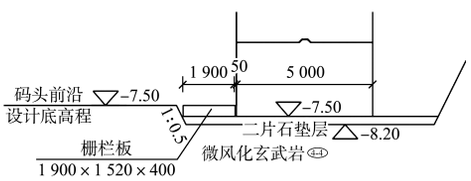
Fig. 2　Plan layout of wharf berth

1#~10#泊位顺岸部分岩面较低，沉箱基床为明基床或混合式基床，抛石基床采用 10~100 kg 块石，厚 3~5 m，在抛石基床前沿设置 400~500 kg 块

石作为护底结构。11#~18#泊位岩面相对较高，沉箱基床为暗基床，设置 0.5 m 二片石垫层整平岩面后，作为重力式沉箱或方块基础，基床前沿设置栅栏板(1 900 mm×1 520 mm×400 mm)作为护底结构。码头墙前护底结构设计典型断面见图 3。



a) 断面1(一期)



b) 断面2(二期)

图 3　墙前护底结构典型断面（高程：m；尺寸：mm）

Fig. 3　Typical section of apron protection (elevation: m; size: mm)

3.2　护底结构验算

3.2.1　按螺旋桨射流影响计算

1）通过 PIANC 荷兰方法，根据式(1)~(3)、(6)，当 2 个主螺旋桨同时作用时，先分别计算各螺旋桨轴线对应的护底处的冲刷流速，再按照冲刷影响叠加的原则通过计算得出最大冲刷速度。主螺旋桨初始射流流速 $v_{0,\mathrm{main}}=5.285$ m/s，最大冲刷流速为 $v_{\mathrm{b,max}}=2.501$ m/s，中值粒径 $D_{50}=0.579$ m，中值质量 $M_{50}=305.65$ kg。

2）按照 JTS 165-6—2008《滚装码头设计规范》，根据式(4)，确定射流流速 $U_0=6.18$ m/s，选取护底块石稳定质量大于 800 kg。

3.2.2　按波浪底流速影响计算

1）按照 CIRIA C683：*The Rock Manual*，根据式(5)可计算出块石名义中值粒径 $D_{\mathrm{n50}}=0.255$ m，再根据式(6)换算出块石中值质量 $M_{50}=44$ kg。

2）按照 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》，波态判别为立波，根据式(7)计算墙前波浪底流速 $v=1.44$ m/s，选取护底块石稳定质量为 50~100 kg。

3.2.3　护底块石计算稳定质量比较

根据稳定质量计算比较可知，滚装码头前沿护底块石稳定质量受螺旋桨射流因素的影响更大，其影响程度远大于波浪底流速的影响。原一期、二期工程设计选用的护底块石规格与 PIANC 荷兰方法的计算结果较为接近，但小于 JTS 165-6—2008《滚装码头设计规范》的推荐值。

表 3　射流冲刷及波浪底流影响下护底块石稳定质量取值范围

Tab. 3　Value ranges of stable weight for apron rock under influence of jet and wave bottom current　kg

PIANC 荷兰方法	滚装码头设计规范	*The Rock Manual*	防波堤与护岸设计规范
300~400	>800	50~100	50~100

3.3　实体检测情况

码头投产运营 5~7 a，建设单位对码头墙前护底结构状态进行检测与安全评估[9]，部分检测结果见表 4。

表 4　各泊位码头墙前基床冲刷检测结果

Fig. 4　Erosion detection results of foundation in front of each berth

泊位编号	冲刷检测情况
1#~2#	1#泊位基床轻微冲刷； 2#泊位基床掏空长度 1.5 m，最大掏空深度 0.3 m
3#~4#	3#泊位基床掏空长度 1.0 m，最大掏空深度 0.9 m； 4#泊位基床掏空长度 2.6 m，最大掏空深度 1.5 m
5#~6#	5#泊位基床掏空长度 16.0 m，最大掏空深度 1.5 m； 6#泊位基床掏空长度 16.9 m，最大掏空深度 3.0 m
7#~8#	7#泊位基床掏空长度 15.3 m，最大掏空深度 2.0 m； 8#泊位基床掏空长度 2.0 m，最大掏空深度 1.0 m
9#~10#	9#泊位基床掏空长度 2.0 m，最大掏空深度 1.4 m； 10#泊位基床掏空长度 4.0 m，最大掏空深度 0.7 m
11#~12#	11#泊位基床掏空长度 10.0 m，最大掏空深度 2.4 m； 12#泊位基床掏空长度 4.0 m，最大掏空深度 0.8 m
13#	13#泊位基床掏空长度 6.0 m，最大掏空深度 1.0 m
14#~15#	14#泊位基床轻微冲刷； 15#泊位基床掏空长度 5.0 m，最大掏空深度 1.0 m
17#	17#泊位基床掏空长度 0.6 m，最大掏空深度 0.9 m
16#、18#	轻微冲刷、基床完好

结果表明，各泊位码头墙前护底结构包括抛石基床结构均存在不同程度的冲刷，甚至较为严重，二期略好于一期，原因包括：

1）一、二期均考虑了滚装船舶特有的尾舵螺旋桨射流扰动冲刷问题，结构设计时根据不同的基床结构特点，分别考虑不同形式和不同范围的护底措施。

2）根据工程泥沙研究[10]港池存在回淤，因此一期工程码头前沿开挖三角区未考虑块石回填，只在基床前肩外坡面设置了 400～500 kg 的块石护面层，前肩顶面未按护底结构考虑防护层。直接导致基床前肩 10～100 kg 块石不足以抵抗船舶靠离泊时尾舵螺旋桨射流引起的强大紊流，从而被掏刷流失。

3）二期工程地质条件相对较好，基岩面较高，基槽通过炸礁成槽，基床较薄且为暗基床，墙前设置了栅栏板护底，以防止二片石垫层被水流冲刷。但由于客观原因，栅栏板护底结构未安装就开展了靠离泊作业；另外，炸礁过程中的超深爆破使基槽实际开挖加深，基槽内块石或二片石厚度远大于 0.5 m，因此检测结果出现最大掏空深度达到或超过 1 m 的情况。

4　结语

1）国内规范缺少针对船舶螺旋桨射流进行防冲刷计算的相关内容，在 JTS 165-6—2008《滚装码头设计规范》中，射流中心速度计算公式与 PIANC 设计手册中的初始射流流速计算公式一致，但护底块石稳定质量是根据初始射流流速计算值直接查表确定，未考虑螺旋桨中心线与冲刷点的距离影响，结果相对偏大。

2）PIANC 设计手册在考虑船舶螺旋桨射流引起的冲刷时，根据码头结构形式、靠泊的船舶类型、螺旋桨参数及靠泊方式等因素，采用不同的冲刷流速计算公式。国内现行设计规范缺少针对船舶螺旋桨射流进行防冲刷计算，建议将该部分计算内容纳入行业标准，为同类工程建设提供规范依据。

3）有掩护港区内的滚装码头护底结构设计，船舶螺旋桨射流的影响远大于波浪底流的影响。建议在实际工程中，结合项目的重要程度，开展物理模型试验等专题研究，确保码头主体结构的安全。

参考文献：

[1] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Code of Design for Breakwaters and Revetments: JTS 154—2018 [S]. Beijing: China Communication Press, 2018.

[2] ESCARAMEIA M. The rock manual, the use of rock in hydraulic engineering [M]. London: CIRIA, 2007.

[3] 刘庄, 许建武. 船舶螺旋桨作用下透空式码头的防冲刷设计[J]. 水运工程, 2021(6): 61-65.
LIU Z, XU J W. Protection design of open quay structures from scour caused by ships [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 61-65.

[4] 黄建, 李闯. 基于国外规范的船舶射流作用下重力式码头护底设计[J]. 水运工程, 2020(10): 52-56.
HUANG J, LI C. Design of gravity quay protection unit under the action of ship jet based on foreign codes[J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 52-56.

[5] 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.
GAO C, CHEN X D. Bottom protection velocity calculation for ship propeller to the vertical quay[J]. Port & waterway engineering, 2017(7): 82-86.

[6] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 滚装码头设计规范: JTS 165-6—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
CCCC Fourth Harbor Consultants Co., Ltd. Code for Design of Ro-Ro Terminal: JTS 165-6—2008[S]. Beijing: China Communication Press, 2008.

[7] 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.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Design code of general layout for sea ports: JTS 165－2013 [S]. Beijing: China Communication Press, 2014.

（下转第 134 页）

水运工程