



深水直立堤明基床护坡和 护肩块体设计

王军，曾冬，沈迪州

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290)

摘要：为了确定深水直立堤明基床护坡和护肩块体的稳定质量，总结了国内外现有计算方法，并结合实际工程的 2D 和 3D 物模试验数据进行对比。结果表明：1) 在长周期大波浪条件下，JTS 154—2018 计算所得的护坡块石质量偏大，说明国标的计算方法在该波浪条件下已经不再适用。2) 正向浪条件下，改进的 Tanimoto 公式计算所得堤身护坡块体稳定质量偏小，建议设计中应适当保守考虑。3) 根据改进的 Tanimoto 公式，随着波浪入射角($<90^\circ$)增大，堤身护坡块体的稳定质量显著增大。4) 重要工程应通过物理模型试验论证设计方案的合理性。

关键词：直立堤；护坡；护肩；物理模型试验

中图分类号：U 656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)07-0101-06

Design of armour units and foot protection blocks for vertical breakwater foundation mound in deep water

WANG Jun, ZENG Dong, SHEN Di-zhou

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: To determine the stable mass of armour units and foot protection blocks for vertical breakwater foundation mound, we summarize calculation methods in Chinese code and other international codes and compare them with the 2D and 3D physical model test data of actual project. The conclusions are as follows: 1) Under the condition of long-term large waves, the mass of slope protection stones calculated by JTS 154-2018 is large, indicating that the calculation method of the national standard is no longer applicable under the wave conditions. 2) When the waves come perpendicular to the faceline of the upright wall, the stable mass of the embankment protection block calculated by the improved Tanimoto formula is small, and it is recommended that appropriate conservative consideration should be given in the design. 3) According to extended Tanimoto's formulas, the stable mass of armour units increases along with bigger incident wave angle($<90^\circ$). 4) It is suggested that the design scheme of important project should be verified by physical model tests.

Keywords: vertical breakwater; armour units; foot protection blocks; physical model test

1 工程概况

阿尔及利亚 Bethioua 矿石码头项目位于阿尔及利亚 Arzew 港的 Bethioua 港区，是 Arzew 港务局为后方钢铁厂提供的配套码头工程^[1]。本工程建设

内容包括一个 15 万吨级的矿石卸船泊位和接岸引堤，码头和引堤的轴线采用一字形布置，轴线方向为北偏东 30°，平面布置见图 1。

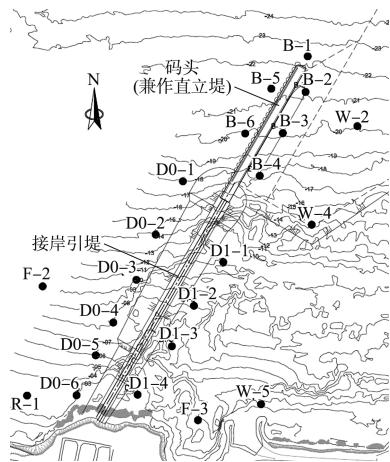


图 1 项目平面布置及波浪特征点位置

工程码头结构兼做防波堤，采用双排圆筒沉箱方案，码头典型断面见图 2。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(含趾)、沿码头前沿方向宽 16 m(含趾)、底板厚 1.05 m，沉箱底高程 -20.50 m。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。

码头基础持力层选用泥灰岩层，基床顶高程 -20.5 m。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。

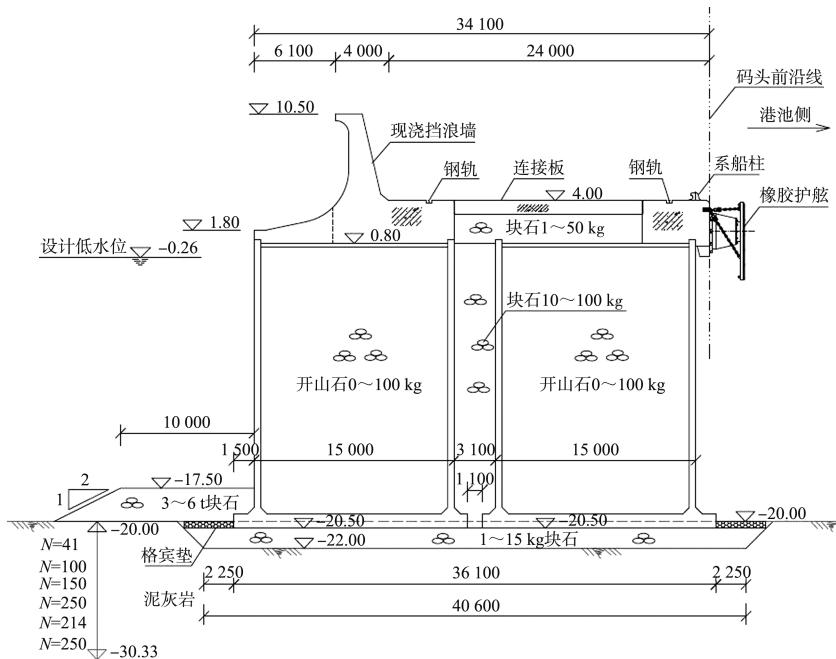


图 2 码头典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

2 设计条件

2.1 水位

本工程设计水位如下(NGA 基面)：极端高水位 0.70 m，极端低水位 -0.60 m，设计高水位 0.34 m，设计低水位 -0.26 m。

2.2 水文条件

码头设计波浪重现期为 100 a，依据项目波浪数值模型报告^[2]，码头海侧设计波浪见表 1，波浪特征点位置见图 1。

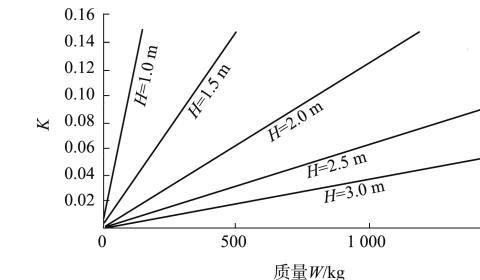
表 1 100 a 一遇码头海侧设计波浪

位置	水深/ m	有效波高 H_s/m	谱峰周期 T_p/s	谱峰周期对应 的波长 L_p/m	波向/ (°)
B-1	-22.5	8.81	14.77	204	344.23
B-5	-21.5	8.70	14.73	200	344.57
B-6	-20.0	8.64	14.67	192	344.72
B-1	-22.5	7.52	13.67	186	1.87
B-5	-21.5	7.49	13.64	183	2.00
B-6	-20.0	7.47	13.59	177	1.71

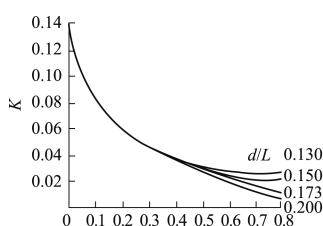
3 明基床护坡块体的计算方法

3.1 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》方法

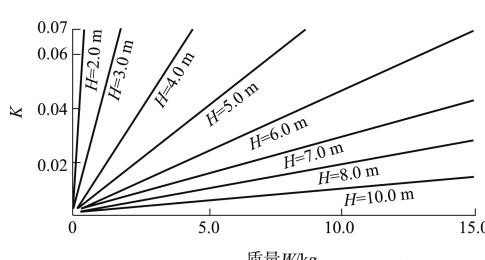
直立堤明基床坡面块体稳定质量可按 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[3]附录 E 确定(图 3)。其中, d_1 为基床顶面水深, d 为堤前水深, H 为设计波高, 采用波高累计频率为 5% 的波高 $H_{5\%}$, L 为计算波长。由 d_1/d 和 d/L 查得系数 K , 可根据图 3 查得块体稳定质量, 也可由公式 $W=K H^3(t)$ 求得块体稳定质量。堤头段基床坡面块体质量应适当加强。



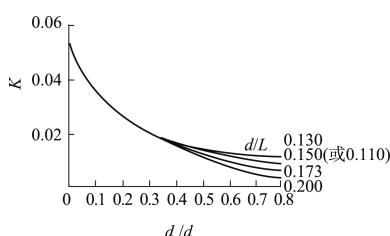
a) 块石 $\rho_b=2.65 \text{ kg/m}^3$, $W-K$ 关系



b) 块石 $\rho_b=2.65 \text{ kg/m}^3$, $d_1/d-K$ 关系



c) 混凝土 $\rho_b=2.30 \text{ kg/m}^3$, $W-K$ 关系



d) 混凝土 $\rho_b=2.30 \text{ kg/m}^3$, $d_1/d-K$ 关系

图 3 JTS 154—2018 明基床基肩和坡面块体稳定质量计算

3.2 改进的 Tanimoto 公式

日标 OCDI^[4]和美标 CEM (EM1110-2-1100)^[5]中, 直立堤明基床护坡块石稳定质量均采用改进的 Tanimoto 公式计算, 见式(1)~(5)。该公式适用于堤身护坡块石稳定质量的确定(波浪入射角 $\leq 60^\circ$)。

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \leq \max \left\{ 1.8, 1.3 \cdot \frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}} \cdot \frac{h'}{H_s} + 1.8 \exp \left[-1.5 \frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}} \cdot \frac{h'}{H_s} \right] \right\} \quad (1)$$

$$B_M/L' < 0.25 \quad (2)$$

$$\kappa = \kappa_1 (\kappa_2)_B \quad (3)$$

$$\kappa_1 = \frac{4\pi h'/L'}{\sinh(4\pi h'/L')} \quad (4)$$

$$(\kappa_2)_B = \max [\alpha_s \sin^2 \beta \cos^2(2\pi l \cos \beta / L'), \cos^2 \beta \sin^2(2\pi l \cos \beta / L')] \quad (5)$$

式中: H_s 为有效波高; D_{n50} 为名义中值粒径; Δ 为相对浮密度, $\Delta = (\rho_s / \rho_w - 1)$; h' 为基床顶面水深; B_M 为肩台宽度; L' 为相应于水深 h' 和有效波周期的波长; α_s 为坡面块石水平时的修正系数 ($\alpha_s = 0.45$); β 为波浪入射角度。当入射波为正向波时, l 取 B_M ; 当入射波为斜向波时, l 取值为 B_M 或 B'_M 两者中使 $(\kappa_2)_B$ 较大的值。各符号的意义见图 4。

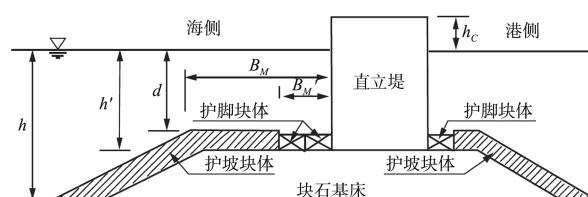


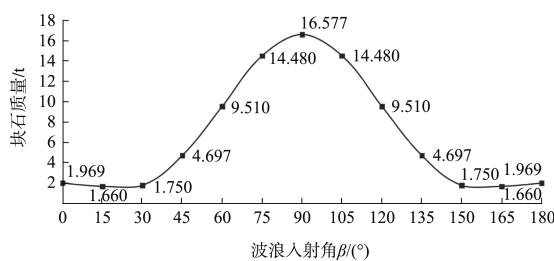
图 4 日标 OCDI 典型的直立堤护肩和护坡块体设置断面

堤头明基床护坡块石的稳定质量计算, 需要修正速度系数 κ , 见式(6)(7), 其稳定质量不宜小于堤身护坡块石稳定质量的 1.5 倍。

$$\kappa = \kappa_1 (\kappa_2)_T \quad (6)$$

$$(\kappa_2)_T = 0.22 \quad (7)$$

根据改进的 Tanimoto 公式, 入射角度会对堤身护坡块体稳定质量产生较大影响, 见图 5。



注: $H_s = 8.81 \text{ m}$; $T_p = 14.77 \text{ s}$ 。

图 5 堤身护坡块石稳定质量与波浪入射角关系

3.3 护坡块体稳定质量计算结果

本工程采用国标 JTS 154—2018 和改进的 Tanimoto 公式计算的明基床护坡块石质量见表 2。

表 2 明基床护坡块体(块石)的稳定质量计算结果

位置	波高 H_s/m	波浪入 射角/(°)	护坡块石质量/t	
			JTS 154—2018	改进的 Tanimoto 公式
堤身	8.81	0	31.33	1.97
		39	-	3.29
堤头	7.52	0	17.37	0.89
		60	-	3.40
堤头	8.81	-	31.33	4.97
		-	-	1.78

注: JTS 154—2018 没有关于斜向浪下直立堤基床护坡块体计算的规定。

4 明基床护肩块体的计算方法

4.1 JTS 154—2018《防波堤和护岸设计规范》法

国标 JTS 154—2018 中对明基床护肩无特别的规定, 设计中可采用护坡块体的稳定质量。

4.2 目标 OCDI 法

目标 OCDI 规定直立堤海侧至少摆放 2 排护肩块体(矩形开孔块体)、港侧至少摆放 1 排护肩块体, 典型直立堤的护肩块体和护脚块体的布置见图 4。

根据 OCDI, 直立式结构护脚块体的稳定质量取决于所需厚度 t , 计算公式为:

$$t/H_{1/3} = d_f (h'/h)^{-0.787} \quad (8)$$

式中: t 为所需护肩块体的厚度; d_f 为系数, 堤头取 0.21, 堤身取 0.18; h 为直立堤前水深; h' 为基床顶水深(不考虑护坡块体厚度)。公式适用范围 $h'/h = 0.4 \sim 1.0$ 。

确定所需护肩块体厚度后, 可按照表 3 选择护肩块体的尺寸。

表 3 OCDI 明基床护肩方块的稳定厚度、尺寸和质量

护肩方块稳定 厚度 t/m	尺寸(长×宽×高)/ ($\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$)	质量/(t·块 $^{-1}$)	
		开孔	不开孔
0.8 或更小	$2.5 \times 1.5 \times 0.8$	6.23	6.90
1.0 或更小	$3.0 \times 2.5 \times 1.0$	15.64	17.25
1.2 或更小	$4.0 \times 2.5 \times 1.2$	24.84	27.60
1.4 或更小	$5.0 \times 2.5 \times 1.4$	37.03	40.25
1.6 或更小	$5.0 \times 2.5 \times 1.6$	42.32	46.00
1.8 或更小	$5.0 \times 2.5 \times 1.8$	47.61	51.75
2.0 或更小	$5.0 \times 2.5 \times 2.0$	52.90	57.50
2.2 或更小	$5.0 \times 2.5 \times 2.2$	58.19	63.25

4.3 CEM 法

美标 CEM (EM1110-2-1100) 采用 Takahashi (1996) 图表确定护肩块体的稳定厚度, 见图 6, 其中: t' 为护肩块体的厚度; H 为设计波高, 建议取 $1.8H_{1/3}$; h_b 为护肩块体顶面水深; h_s 为直立堤前水深。

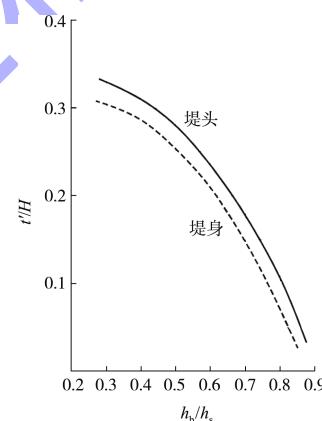


图 6 CEM 护肩块体设计

4.4 护肩块体计算结果

表 4 对比目标 OCDI 和美标 CEM 的明基床护肩块体的稳定质量计算结果。

表 4 明基床护肩块体的稳定质量计算结果

规范	位置	护肩块体稳定 厚度 t/m	块体选型/ ($\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$)
目标 OCDI	堤身	1.68	$5.0 \times 2.5 \times 1.8$
	堤头	1.96	$5.0 \times 2.5 \times 2.0$
美标 CEM	堤身	0.40	$2.5 \times 1.5 \times 0.8$
	堤头	0.56	$2.5 \times 1.5 \times 0.8$

5 理模型试验

本工程的 2D 和 3D 物理模型试验在阿尔及利亚海洋研究实验室完成^[6-7], 以验证设计方案的合理性。码头(兼做直立堤)的 2D 断面物理模

型和3D物理模型均为正态模型,按照弗劳德相似准则设计,2D和3D物理模型的试验几何比尺分别为1/56、1/68。试验采用的波浪要素见表5、6。

表5 -22 m水深处折射后2D物理模型试验波浪数据

重现期/a	H_s/m	T_p/s
2	3.99	10.57
5	5.12	11.93
10	5.97	12.77
20	6.85	13.47
50	8.06	14.31
100	8.80	14.77
200	9.58	15.23

表6 -26 m水深处3D物理模型试验波浪数据

重现期/a	N 339°		N359°		N17°	
	H_s/m	T_p/s	H_s/m	T_p/s	H_s/m	T_p/s
2	3.98	9.77	3.71	9.41	4.19	10.04
5	5.00	11.00	4.55	10.48	4.81	10.78
10	5.76	11.79	5.03	11.03	5.31	11.33
25	6.53	12.50	5.68	11.71	5.75	11.78
50	7.65	13.42	6.52	12.50	6.41	12.40
100	8.37	13.94	7.12	13.00	6.94	12.86
200	9.20	14.49	7.77	13.51	7.42	13.24

为充分论证直立堤明基床护坡和护肩设计方案的合理性,本工程设计了多种护坡方案在2D和3D物理模型试验中验证稳定性,这些方案的试验结果见表7。

表7 2D和3D物理模型试验护坡方案

位置	试验类型	护坡	护肩	试验结果
堤身	2D	1~3 t块石	1~3 t块石	不稳定
	2D	单层12 t Antifer块	6 m×2.5 m×1.6 m混凝土块	稳定
	3D	2~4 t块石	2~4 t块石	稳定
	3D	3~6 t块石	3~6 t块石	稳定
堤头	3D	单层12 t Antifer块	6 m×2.5 m×1.6 m混凝土块	稳定
	3D	3~6 t块石	6 m×2.5 m×1.6 m混凝土块	稳定
	3D	单层12 t Antifer块	6 m×2.5 m×2 m混凝土块	稳定

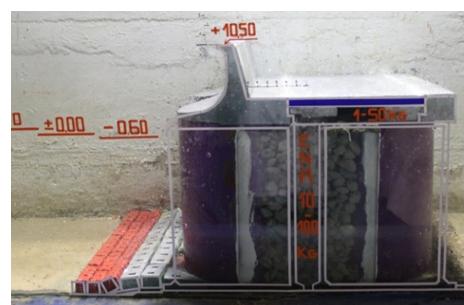
注:Antifer块是地中海国家广泛使用的一种防波堤护面块体,具有结构坚固、抗冲击力强、对长周期大波浪的适应性更好、易修复等优点。Antifer块的设计方法见文献[8]。

根据物理模型试验结果,本工程最终确定的设计方案见表8。

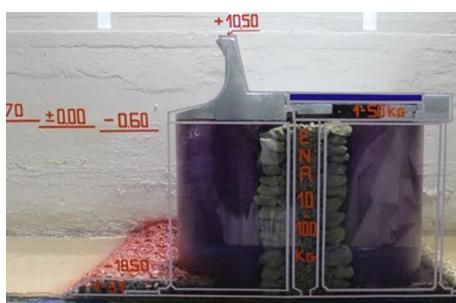
表8 本工程施工图阶段直立堤的护坡和护肩设计方案

位置	护坡	护肩
堤身	3~6 t块石	3~6 t块石
堤头	单层12 t Antifer块	6 m×2.5 m×1.6 m混凝土块

注:堤头护肩块体规格根据3D物模试验选用,其厚度小于OCDI设计值(2.0 m),大于CEM设计值(0.8 m),见表3。



b) 12 t Antifer块体2D



a) 护坡1~3 t块石2D



c) 护坡3~6 t块石3D



d) 护坡单层12 t Antifer块石3D

图 7 护坡单层 12 t Antifer 物理模型试验照片

6 结论

1) 国标 JTS 154—2018 在长周期大波浪 ($H_s = 8.81 \text{ m}$, $T_p = 14.77 \text{ s}$) 条件下, 计算所得的护坡块石质量 (31.33 t) 偏大, 说明国标的计算方法在该波浪条件下已经不再适用。

2) 正向浪条件下 (波浪入射角 0°), 根据改进的 Tanimoto 公式计算所得堤身护坡块体稳定质量为 1.97 t, 在 2D 物模试验中 1~3 t 块石 (中值为 2 t) 并不稳定, 说明该方法在正向波浪条件下计算的结果偏小, 设计中需要适当的保守考虑。

3) 斜向浪条件下, 根据改进的 Tanimoto 公式, 随着波浪入射角 ($<90^\circ$) 增大, 堤身护坡块体的稳定质量显著增大。本工程直立堤堤身的护坡块石稳定质量计算值为 3.4 t, 在 3D 物模试验中验证 2~4 t 块石 (中值为 3 t) 也是稳定的, 公式计算和试验较吻合。但由于在其他大角度下, 护坡块石的计算值明显偏大 (如 $H_s = 8.81 \text{ m}$, $\beta = 60^\circ$ 时, 公式计算值 9.51 t, 3D 物模没有模拟该工况), 因此波浪入射角对护坡块石稳定质量的影响有待进一步研究。

4) 根据改进的 Tanimoto 公式, 堤头护坡块石稳定质量计算值为 4.97 t, 3D 物模试验中, 3~6 t 护坡块石 (中值 4.5 t) 稳定, 公式计算值和试验结果较吻合。

5) 对于护肩块体, 目标 OCDI 计算所得的稳定厚度比较保守。OCDI 中提到护肩块体的主要作用是防止基床碎石被淘刷。本工程堤身取消护肩块体, 通过在基床块石外设置格宾垫来防止淘刷, 通过了物模试验的验证。

6) 国内外的计算方法与 2D & 3D 物模试验结果均存在一定偏差, 建议重要工程通过物模试验验证设计方案的合理性。

参考文献:

- [1] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 阿尔及利亚 Bethioua 矿石码头工程详细设计[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2017.
- [2] 阿尔及利亚海洋研究实验室. BETHIOUA 矿石码头设计与施工项目: 波浪数模研究报告[R]. 阿尔及尔: 阿尔及利亚海洋研究实验室, 2017.
- [3] 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, 2018.
- [4] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009.
- [5] US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual-Part VI: EM 1110-2-1100 (Part VI) [S]. Washington D. C.: U. S. Government Printing Office, 2011.
- [6] 阿尔及利亚海洋研究实验室. BETHIOUA 矿石码头设计与施工项目: 码头 2D 波浪物理模型试验报告[R]. 阿尔及尔: 阿尔及利亚海洋研究实验室, 2017.
- [7] 阿尔及利亚海洋研究实验室. BETHIOUA 矿石码头设计与施工项目: 港池波浪挠动和稳定性试验(3D) [R]. 阿尔及尔: 阿尔及利亚海洋研究实验室, 2017.
- [8] 刘庄, 王军, 郭隆治. 斜坡式防波堤护面块体 (ANTIFER) 设计实例[J]. 水运工程, 2019(9): 150-154.