

块石密度对护面结构防护效果的影响

周明奎，郭立栋，高长生

(中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要：块石是港口工程中的传统材料，通常块石密度越大，防护效果越好。依托非洲某水工项目，探讨中标与英欧标准在块石护面结构设计上的异同，并重点讨论了块石密度对护面结构防护计算结果的影响。经分析，在单个块体稳定重量、护面层厚度、垫层石厚度和单位面积消耗吨数上，高密度块石相比于普通块石均降低明显，文中给出了两者的关联公式，为类似条件下防护工程的设计与施工提供了一定借鉴。

关键词：吹块石密度；护面结构；防护工程；英欧标准

中图分类号：U656.2 文献标志码：A 文章编号：2095-7874(2018)06-0038-04

doi:10.7640/zggwjs201806009

Influence of stone density on protection effect of armor block

ZHOU Ming-kui, GUO Li-dong, GAO Chang-sheng

(CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Block stone is a traditional construction material used in port engineering. Usually, the greater the density of the block stone is, the better its protective effect is. Based on an African port project, we discussed the similarities and differences between Chinese standards and British and European standards in the structural design of armor block, and emphatically discussed the influence of stone density on calculation results of armor block protection. The analysis shows that the high density block stone is obviously lower than the ordinary block stone on the stable weight of the single block, the thickness of the armor layer, the thickness of the underlayer rock and the tonnage of the unit area. The correlation formulas are given in this paper, which provides reference for design and construction of protection engineering under similar conditions.

Key words: stone density; armor block; protection engineering; British and European standards

0 引言

作为港口工程中的传统材料，块石经常被用作斜坡式防波堤的护面结构，覆盖在堤心材料外层，其作用是对堤心材料形成有效防护，从而使堤心和其它部位不受波浪、水流的侵蚀及破坏。通常认为块石密度越大，防护效果越好，但块石密度对护面结构防护效果的影响具体有多大，特别是中标和英欧标准体系下有多大差异，并没有清晰的认知。

在非洲西南部某港口项目中，主要采用英欧

标准，其防波堤护面、高桩码头岸坡和防冲刷护底等均为块石结构。当地开采的石料密度较高，明显高于常规的 2.65 t/m^3 ，这对结构设计及成本控制有着直接的影响。通过中标 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》^[1]与相关英欧标准的对比，在探讨块石护面结构设计异同的基础上，分析块石密度对护面结构计算的影响，为类似项目提供参考。

1 块石检测指标

本项目石料的开采地，处于刚果克拉通（被称为“绿石带”）的一部分，形成于前寒武纪，是最古老的岩石之一，岩石以超碱岩为主。

经试验检测，该石料岩性为片麻岩，深绿色，

收稿日期：2018-03-23 修回日期：2018-04-27

作者简介：周明奎（1966—），男，辽宁丹东人，副总经济师，主要从事项目管理工作。E-mail：zhoumk@ccccyhj.com

主要有石英、长石组成, 其中: 石英为粒状, 部分粒内呈波状消光, 少量呈强波状消光; 长石, 以斜长石为主, 板状。其中强波状消光石英具碱活性, 属碱硅酸活性矿物, 含量约 2%。

片麻岩是一种优质的护面和堤心石材料, 在英标 BS 6349.7—1991《防波堤设计和施工指南》^[2]中其密度范围是 2.8~3.0 t/m³, 而现场实测范围在 3.01~3.06 t/m³, 基本满足规范要求, 设计中将该石料的密度取为 $\rho_s = 3.0 \text{ t/m}^3$ 。

2 块石设计计算公式

2.1 防波堤护面

2.1.1 块体稳定重量

目前国内外有许多计算护面块体稳定重力的公式^[3], 英欧标准体系中主要推荐了两种计算方法: Hudson 公式和 Van der Meer 公式, 而中标只选用了最为常用的 Hudson 公式。Hudson 公式是基于规则波试验和射流理论, 形式简单, 使用方便, 应用广泛, 能够计算不同铺置形式、不同结构的护面块体的稳定重力, 有研究^[4]表明在未考虑波坦影响的稳定重量计算公式中, Hudson 公式可以很好地满足工程可靠度和工程经济两方面要求, 是同类型公式中的佼佼者; Van der Meer 公式则基于不规则波试验, 考虑了许多 Hudson 公式未考虑的因素, 包括波浪周期、波浪破碎条件、破碎相似参数、堤心渗透性、风暴延时等。

为更好地将中标与英欧标准相结合, 本文主要针对 Hudson 公式在块石护面上的应用进行了探讨。在此参考了 3 个英欧标准, 分别是英标 BS 6349.7—1991《防波堤设计和施工指南》、CIRIA C683《块石手册》^[5]和 EAU 2012《港口航道滨水结构委员会的建议》^[6]。《块石手册》是一个全面的石料应用参考指南, 涵盖河流、内河、河口、海岸等岩石工程, 并包含一些混凝土护面块体的工程资料。《港口航道滨水结构委员会的建议》是德国港口技术协会滨水结构委员会和岩土工程技术协会推荐使用的规范。

Hudson 公式的具体形式如下:

$$W = 0.1 \frac{\gamma_b H^3}{K_D (\Delta')^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

$$\Delta' = \frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o} \quad (2)$$

式中: W 为单个块体的稳定重量, t ; γ_b 为块体材料的重度, kN/m^3 ; H 为设计波高, m ; K_D 为块体稳定系数; α 为斜坡与水平面的夹角, ($^\circ$)。 ρ_s 为填料密度; ρ_o 为水密度, 本文取值 1.025 t/m^3 ; Δ' 为相对密度。

在中标与英欧标准中, Hudson 公式的基本形式是一致的, 但其设计参数的取值有所区别, 特别是设计波高和稳定系数。以抛填两层块石为例, 表 1 中列举了上述几种规范的差异。

表 1 几种规范在设计波高和块体稳定系数上的差异

Table 1 The differences of design wave height and block stability in some kinds of standards

规范名称	JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》	BS 6349.7—1991《防波堤设计和施工指南》	CIRIA C683《块石手册》	EAU 2012《港口航道滨水结构委员会的建议》
设计波高	对斜坡式建筑物的设计波高, 一般采用 $H_{1/3\%}$ (约等于 H_s), 而当 $H/d < 0.3$ 时, 宜采用 $H_{5\%}$ ^[7] 。	对于波浪未破碎区域设计波高需采用 $H_{1/10}$ (约等于 $H_{4\%}$), 对于破碎区可采用有效波高 H_s (即 $H_{1/3}$, 约等于 $H_{13\%}$)或者极限破碎波高(H_b)之中较大值。	采用 Hudson 公式计算块石护面, 设计波高均取用 $H_{1/10}$ (约等于 $H_{4\%}$)。	①在有效波高不大于 1.5 m, 级配区间 $0.22W_{50}\sim 3.5W_{50}$ 的前提下, 护面块石设计波高采用的是有效波高 H_s 。 ②采用 Hudson 公式计算时, 波高最小采用有效波高 H_s 。
块体稳定系数	抛填两层块石, $K_D=4$	粗糙有棱角, 任意摆放, 堤身, 破碎波 $K_D=2.0$, 未破碎波, $K_D=4.0$; 堤头, 对于不同的岸坡斜度, 均给出了参考取值。	同 BS 6349	同 BS 6349; 情况①时, 取值较常规较小: 破碎波, $K_D=2.2$, 未破碎波, $K_D=2.5$

由表 1 可知, 对于深水波且波浪未破碎情况下, 英欧标准中所采用的设计波高是比较大的, 且多推荐采用 $H_{1/10}$ 。在抛填两层块石的条件下, 中标的 K_D 是一个定值 4, 而英欧标准则根据块体

是否粗糙有棱角、波浪是否破碎、处于堤头还是堤身等因素的不同而有所变化, 且对摆放方式没有要求。总体来说, 在部分条件下英欧标准中 K_D 的取值比中标要小, 则计算出的单个块体的稳定

重量必定比中标结果要大。

2.1.2 护面层厚度

中标与英欧标准中，斜坡堤护面层厚度的计算公式也基本一致，只有块体形状系数的取值存在些许差别，如英标规定当护面块体为块石 $n'=2$ 时，粗糙有棱角块石的形状系数取为 1.15，中标则取值 1.0。

斜坡堤护面层厚度可按下式计算：

$$h = n'c \left(\frac{W}{0.1\gamma_b} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式中： W 为单个块体的稳定重量，t； h 为护面层厚度，m； n' 为护面块体层数； c 为块体形状系数； γ_b 为块体材料的重度， kN/m^3 。

2.1.3 垫层石厚度

根据中标《防波堤设计与施工规范》的规定，外坡护面垫层块石的重量可取式(1)确定的块体重量的 $1/20\sim1/10$ ，但最小重量不小于 $1/40$ ，本文按 $1/15$ 进行计算。斜坡堤护面的块石垫层厚度不应小于按式(3)计算的两层块石的厚度。

2.2 高桩码头下方岸坡和防冲刷护底

本工程中，码头结构形式为高桩码头，码头下方岸坡采用块石结构，港池水深-14 m，同样采用块石进行护底，码头结构见图 1。

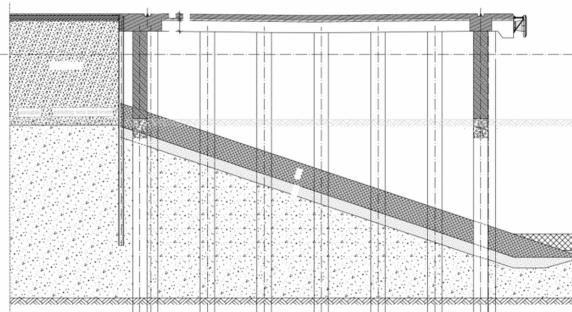


图 1 码头结构图
Fig. 1 Wharf structure section

在国内的码头、海岸工程设计中，码头岸坡和防冲刷护底的块石稳定性计算主要针对波浪和水流作用，而未考虑船舶螺旋桨或推进器的影响^[8]。但是随着经济的快速发展，国内外船舶日趋大型化和高速化，船用螺旋桨或推进器的尺寸随之加大，引擎功率大幅提升，推力大幅增加，也就导致了船舶周边流速不断增大。

石料作为最常用的保护系统之一，要适当地防止螺旋桨或推进器对底层土造成的损害。当流

速超过护底或护坡块石原设计的起动流速时，即会发生块石冲刷、淘蚀等现象(参考图 2)，从而导致防护结构的进一步破坏。因此，在码头设计中，需充分地考虑船舶螺旋桨及推进器对水流的影响。

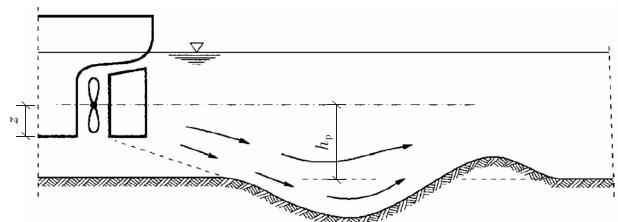


图 2 尾流冲刷示意图

Fig. 2 Wash caused by stern thrusters

在本项目码头岸坡和护底的块石稳定性计算中，采用了《港口航道滨水结构委员会的建议》中提供的计算公式：

$$d_{\text{reqd}} >> \frac{v_{\text{btm}}^2}{B^2 \cdot g \Delta'} \quad (4)$$

式中： d_{reqd} 为块石粒径，一般而言 $d_{50} \approx d_{\text{reqd}}$ ，对于码头岸坡来说 $d_{50} = 1.5d_{\text{reqd}}$ ； v_{btm} 为底部流速(受船舶螺旋桨或推进器影响)； B 为稳定系数，没有中央舵的船尾推进器 $B = 0.9$ ，有中央舵的船尾推进器 $B = 1.25$ ，船艏推进器 $B = 1.2$ 。

$$W_{50} = \rho_s \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_{50}}{2} \right)^3 \quad (5)$$

通过式(4)、式(5)可知，单个石块重量取决于石块密度和底部流速。

3 工程参数

当地潮汐为正规半日潮，潮升约 2 m，平均高潮位为 +1.80 m，设计高水位为 +2.9 m。码头及堆场施工海域的水深为 -5.6~ -6 m，海底流速约 0.1 m/s。波浪方向主要为南向、西南向，有效波高见图 3，设计波周期 18 s。该海域常年存在长周期波。波浪特点如下：

1) 雨季(10月—次年4月)波高较小，海况好；旱季(5—9月)波高较大，波周期长，海况差。

2) 涌浪的波浪周期，趋势上随着波高的增大而增大。

3) 最大波高在农历月底前后出现的频率比较高。

由图 3 可知，西围堤(观测点 5—8)处于迎浪

面, 波高大, 有效波高最大值约为 3.5 m, 是“主”防波堤; 南围堤(观测点 8~9)和引堤海侧(观测点 9~12), 处于背浪面, 明显受到掩护, 是“副”防波堤。

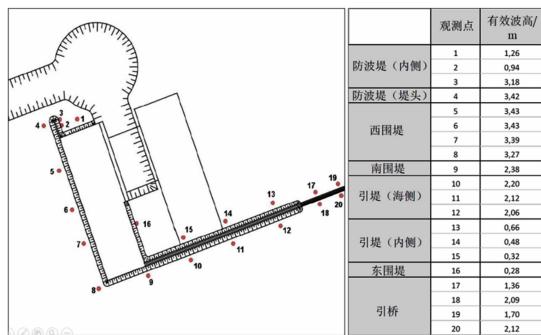


图 3 防波堤有效波高

Fig. 3 Significant wave height of breakwater

4 计算结果及分析

4.1 防波堤护面

以西围堤、南围堤和引堤为例, 将该高密度块石与普通块石($\rho_s = 2.65 \text{ t/m}^3$)在护面层单个块体的稳定重量、护面层厚度、垫层石厚度、护面层单位面积消耗吨数等方面进行对比, 寻找它们之间的相互关系。以下计算中, 主要根据《防波堤设计和施工指南》选用技术参数, 比如设计波高采用 $H_{1/10}$ ($\approx 1.27H_s$); 护面块体层数取 $n' = 2$, 则块体稳定系数(未破碎波) $K_D = 4$, 块体形状系数为 $c = 1.15$ 。在护面层单位面积消耗吨数计算中, 参考了中标《防波堤设计与施工规范》关于块石空隙率的规定, 取值 $P = 40\%$ 。

通过 2.1 节中防波堤坡面的设计计算公式, 可得到结果如表 2。

表 2 防波堤坡面计算结果

Table 2 Calculation results of slope surface for breakwater

计算项	西围堤 $H_s=3.5 \text{ m}$		南围堤 $H_s=2.8 \text{ m}$		引堤 $H_s=2.4 \text{ m}$	
	普通块石	高密度块石	普通块石	高密度块石	普通块石	高密度块石
单个块体稳定重量 W_{50}/t	9.65	6.11	4.94	3.13	3.11	1.97
护面层厚度 h/m	3.54	2.92	2.83	2.33	2.43	2.00
垫层石厚度 h/m	1.43	1.18	1.15	0.94	0.98	0.81
单位面积消耗吨数 $QTY/(\text{t} \cdot \text{m}^{-2})$	5.63	5.26	4.50	4.19	3.86	3.60

4.2 码头岸坡和护底

对于码头岸坡和护底的底部流速, 根据 EAU2012 的要求进行计算(设计波高采用 1.5 m)。稳定系数, 采用有中央舵的船尾推进器时的取值 $B=1.25$ 。通过 2.2 节中的设计计算公式, 可得到结果如表 3。

表 3 高桩码头岸坡和护底计算结果

计算项	码头岸坡和护底: 设计波高 1.5 m	
	普通块石	高密度块石
码头护底单个块体的稳定重量 W_{50}	0.74	0.45
码头岸坡单个块体的稳定重量 W_{50}	3.41	2.09

4.3 计算结果分析

1) 对于斜坡堤护面层、高桩码头下方岸坡和防冲刷护底的单个块体稳定重量, 高密度块石和普通块石的相对关系是 $W_{\text{高}} = [\rho_{\text{高}} (\rho_{\text{普}} - \rho_{\text{水}})^3] / [\rho_{\text{普}} (\rho_{\text{高}} - \rho_{\text{水}})^3] W_{\text{普}}$ 。以密度 2.65 t/m^3 的普通块石和

3 t/m^3 的高密度块石比较, 高密度块石的稳定重量设计值降低了 37%。

2) 对于斜坡堤护面层厚度、垫层石厚度, 高密度块石和普通块石的相对关系是 $h_{\text{高}} = (\rho_{\text{普}} - \rho_{\text{水}}) / (\rho_{\text{高}} - \rho_{\text{水}}) h_{\text{普}}$ 。以密度 2.65 t/m^3 的普通块石和 3 t/m^3 的高密度块石比较, 高密度块石的厚度设计值降低了 18%。

3) 对于斜坡堤护面层单位面积消耗吨数, 高密度块石和普通块石的相对关系是 $QTY_{\text{高}} = [\rho_{\text{高}} (\rho_{\text{普}} - \rho_{\text{水}})] / [\rho_{\text{普}} (\rho_{\text{高}} - \rho_{\text{水}})] QTY_{\text{普}}$ 。以密度 2.65 t/m^3 的普通块石和 3 t/m^3 的高密度块石比较, 高密度块石用量降低了 7%, 节省了施工成本。

5 结语

1) 对于深水波且波浪未破碎情况下, 英欧标准中所采用的设计波高是比较大的, 且多推荐采用 $H_{1/10}$ 。在部分条件下英欧标准中 K_D 的取值比中

(下转第 58 页)