

境外人工岛护岸挡墙波浪力计算方法实践应用

邓 涛, 方 波, 赵家林

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 挡墙是斜坡式护岸的重要组成部分, 用来减少波浪对后方回填陆域的影响。作为挡墙稳定性的决定因素, 波浪力的计算一直是实际工程中研究和探讨的热点。以东南亚某大型人工岛工程斜坡式护岸为例, 分析国际规范 *Coastal Engineering Manual* 和 *The Rock Manual* 提出的 3 种被广泛应用的挡墙波浪力计算方法, 以及最新研究的采用越浪量计算挡墙波浪力的方法, 对比这 4 种方法的计算结果、特点和适用范围, 并对比分析本工程二维模型试验结果和以上 4 种方法的计算结果。结果表明, Pedersen 公式与实测结果一致性较好, 可供类似工程参考。

关键词: 斜坡式护岸; 波浪力; 挡墙; 人工岛

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0049-06

Application of calculation method for wave force on crown wall of revetment in international artificial island projects

DENG Tao, FANG Bo, ZHAO Jia-lin

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

Abstract: The crown wall is a crucial part of sloping revetment, being used to reduce the wave impact on the backfilling structure behind the wall. As an important force influencing the stability of wave walls, estimation of wave forces is always a hotspot of research in engineering practice. Taking a sloping revetment of an artificial island project in Southeast Asia as an example, we analyze the three widely used calculating methods for wave force acting on crown walls, proposed by *Coastal Engineering Manual* and *The Rock Manual*, and a recently proposed method using overtopping results to estimate wave forces. We also compare and analyze the features and application scope of these methods based on an actual project, and compare the results of the 2D physical model test of this project with the calculating results of the four methods. The results show that Pedersen formula gives more close results to the actual measurement results, which can provide good references for similar projects.

Keywords: sloping revetment; wave force; crown wall; artificial island

斜坡式护岸是海岸工程中常用的水工建筑物, 其主要作用是通过削弱波浪力和阻挡越浪减少波浪对后方回填陆域的影响。挡浪墙是斜坡式护岸的重要组成部分, 其为检查和维修提供通道, 防止或降低越浪, 并可配合内侧的各种需要和其他经营活动。挡浪墙作为重力式结构应保证稳定, 影响其稳定性的荷载主要为波浪荷载, 因此作用在挡浪墙上的波浪荷载在学术研究和工程实际中

一直是重点关注的问题。

The Rock Manual^[1] 和 *Coastal Engineering Manual*^[2] 均推荐两个由试验数据拟合得到的经验公式, 即 Jensen & Bradbury 公式和 Pedersen 公式, 其中前者认为作用在挡墙上的波浪力主要受波高、波长和挡墙顶高程的影响, 但公式忽略了护面块石对波浪力的削弱作用, 并且对波浪周期的影响也考虑不全面, 有研究表明其计算结果与实测值

收稿日期: 2021-11-16

作者简介: 邓涛(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口结构设计。

偏差较大^[3]；后者认为越浪量会对挡墙波浪力产生影响，并将波浪爬高作为联系两个变量的重要参数，推导出由波浪的虚拟爬高计算挡墙波浪力的公式。*The Rock Manual* 除了以上两个公式还推荐了 Martin 公式，并通过对比认为 Pedersen 公式在模拟波浪状态下的水平波浪力和浮托力与实测值较为接近，而 Martin 公式是通过单独计算波浪冲击力和脉动力可以很好地模拟单个波的物理过程。近年来，Molines 等^[4]通过神经网络的方法建立了以越浪量为自变量的计算公式。

由此可知，上述 4 种方法各有特点及适用范围，本文从实际应用的角度出发，通过对某境外大型人工岛护岸挡墙波浪力的计算和物理模型试验，研究各公式在实际工程中的应用效果，以便为类似人工岛工程护岸的设计提供科学依据。

1 挡墙波浪力计算方法

1.1 Jensen & Bradbury 公式

Jensen & Bradbury 公式推导出的最大水平波浪力 F_H 可由下式计算：

$$F_H = \rho_w g d_c L_{op} \left(\frac{a H_s}{R_{ca}} - b \right) \tag{1}$$

式中： H_s 为有效波高 (m)； L_{op} 对应谱峰周期的深水波波长 (m)； d_c 为挡浪墙高程 (m)； R_{ca} 为挡浪墙顶距离静水面的高程 (m)； ρ_w 为海水密度 (kg/m^3)； a 、 b 为经验系数，取值见 *The Rock Manual* 表 5.49。

挡浪墙底部浮托力呈三角形分布，由挡浪墙海侧 p_U 减少至内侧为零， $p_U = F_H/d_c$ ，总的浮托力计算如下：

$$F_U = (\rho_w g B_c L_{op}/2) \left(\frac{a H_s}{R_{ca}} - b \right) \tag{2}$$

式中： B_c 为挡浪墙底宽。

1.2 Pedersen 公式

HAMILTON 等^[5]研究表明，在中等越浪量的情况下，作用在挡墙上的波浪力随着波高的增加而增大，但当波浪增大到一定程度，造成了较大的越浪量时，挡墙上的波浪力将达到其限制，不再随波高的增大而增大。基于这一现象，Pedersen

开展了挡墙波浪力与越浪相关性的分析研究，并得到基于虚拟波浪爬高的经验公式。

Pedersen 公式中波浪力计算公式为：

$$F_{H,0.1\%} = 0.21 \sqrt{\frac{L_{om}}{B_a}} \left(1.6 p_i y_{eff} + \frac{p_i}{2} V d_{c,prot} \right) \tag{3}$$

$$M_{H,0.1\%} = 0.55 (d_{c,prot} + y_{eff}) F_{H,0.1\%} \tag{4}$$

$$p_{U,0.1\%} = 1.0 V p_i \tag{5}$$

式中： $F_{H,0.1\%}$ 、 $M_{H,0.1\%}$ 、 $p_{U,0.1\%}$ 分别为超越概率为 0.1% 的水平波压力、弯矩、浮托力； L_{om} 为对应平均周期的深水波波长； B_a 为挡浪墙前护面层宽度； $d_{c,prot}$ 为有护面掩护的挡浪墙厚度； V 为 V_2/V_1 与 1 之间的小值，其中 V_1 为挡浪墙前护面块石防护区域的面积 (m^2)， V_2 为波浪爬高所假定的楔形区域的面积 (m^2)； y_{eff} 为 $y/2$ 与 d_{ca} 之间的小值，其中 d_{ca} 为无护面掩护的挡浪墙高度 (m)， y 为在波浪爬高所假定的楔形区域内对应墙前块石边界处的自由液面高度 (m)。

1.3 Martin 公式

Martin 公式给出了破碎波对于挡浪墙的波浪力计算。公式将波浪力作用的过程分为 2 个峰值，第 1 个峰值为冲击压强，即由于挡浪墙存在导致波浪方向突然变化而产生的；第 2 峰值为脉动压强，由于波浪爬高和回落产生。

1) 冲击压强。未被护面掩护的挡浪墙部分冲击压强计算公式为：

$$p_i = p_{S_0} = c_{wl} \rho_w g S_0 \tag{6}$$

$$S_0 = H (1 - R_{ca}/R_u) \tag{7}$$

$$c_{wl} = 2.9 [(R_u/H) \cos \alpha]^2 \tag{8}$$

式中： p_{S_0} 为 S_0 处的冲击压强； S_0 为护面防护部分挡浪墙海侧对应的波浪最大爬高 (m)； R_{ca} 为挡浪墙顶距离静水面的高程 (m)； α 为斜坡护岸的倾斜角； R_u 为波浪爬高，计算公式如下：

$$R_u/H = A_u [1 - \exp(-B_u \xi)] \tag{9}$$

式中： H 为堤脚处的设计波高 (m)； ξ 为碎波相似系数，可通过 $\xi = \tan \alpha / \sqrt{(H/L_0)}$ 计算，其中 L_0 为深水波波长， A_u 、 B_u 为相关参数，取值可参照 *The Rock Manual* 图 5.86。

护面块体防护的挡浪墙部分冲击压强计算公式为:

$$p_i = c_{w2} p_{s0} \tag{10}$$

$$c_{w2} = 0.8 \exp(-10.9 B_a / L_p) \tag{11}$$

式中: L_p 为对应谱峰周期的波长(m); B_a 为挡浪墙前护面层宽度(m)。

2) 脉动压强。脉动压强 p_p 计算公式为:

$$p_p = c_{w3} \rho_w g (S_0 + R_{ca} - z) \tag{12}$$

$$c_{w3} = a \exp c_0 \tag{13}$$

$$c_0 = c (H / L_p - b)^2 \tag{14}$$

式中: z 为以静水面为基准的坐标值; a 、 b 、 c 为相关系数, 取值见 *The Rock Manual* 表 5.51。

挡浪墙底海侧浮托力等于墙前底的水平波压强度, 冲击压强的浮托力, 海侧 $p_i = c_{w2} p_{s0}$; 脉冲压强的浮托力, 海侧 $p_p = p_{re}$, p_{re} 为海侧墙底处的水平向波压力。

挡浪墙底内侧浮托力在冲击压强时为 0; 在脉冲压强情况下, 挡浪墙底内侧浮托力在冲击压强由海侧逐渐减小, 减小的程度与挡浪墙基础的孔隙率 n_v 有关。

1.4 Molines 公式

在模型试验中, 对波浪爬高的测量往往比较困难, 而越浪量的测量较为简单和准确, 因此 Molines 在前人研究的基础上, 通过神经网络方法研究作用在挡墙上的波浪力与越浪量的关系, 并推导出了相关计算公式。此公式中的越浪量是以 274 组试验数据为输入条件, 采用神经网络方法总结分析得到。

Moline 公式中的水平向波浪力与无量纲越浪量大致呈线性关系, 计算公式为:

$$F_H = \frac{F_{H,0.1\%}}{0.5 \rho g C_h^2} = 3.6 + 0.6 \lg Q \pm 0.63 \tag{15}$$

最大浮托力计算如下:

$$p_{bF} = \frac{p_{b(F_{H,0.1\%})}}{0.5 \rho g C_h} = 0.02 \left(\frac{F_c}{L_{op}} \right)^{-1/2} \pm 0.45 \tag{16}$$

水平波浪力引起的弯矩计算如下:

$$M_{HF} = \frac{M_{H(F_{H,0.1\%})}}{\rho g C_h^3} = 1.08 + 0.18 \lg Q \pm 0.19 \tag{17}$$

式中: L_{op} 为深水波长; C_h 为挡墙高度; F_c 为挡墙底高程; Q 为无量纲越浪量。浮托力引起的弯矩可通过荷载在挡墙底部的分布情况进行计算。

与前文所述其他公式相比, Moline 公式的优势在于通过较少的参数就能较准确地计算出作用在挡墙上的波浪力。

2 工程应用

2.1 工程概况

某大型围填海工程位于菲律宾的马尼拉湾, 由 3 座人工岛组成(拟建 A、B、C 岛, D 岛作为预留)。工程主体包括 3 座人工岛的陆域吹填、海侧护岸、运河护岸和护底等。其中海侧护岸采用斜坡式护岸, 总里程约为 8.8 km, 由于护岸面向马尼拉湾, 波浪条件较差, 因此海侧护岸的结构稳定性研究在工程建设中具有重要的意义。

本文以 B 岛为例, 海侧护岸由护面块石、垫层块石、碎石倒滤层和土工布组成, 整体坡度为 1:4, 在护岸中部高程为 -0.48 m 处设置 1 个宽度为 10 m 的肩台, 挡墙前肩台宽度取 2.2 m, 典型海侧护岸断面如图 1 所示。

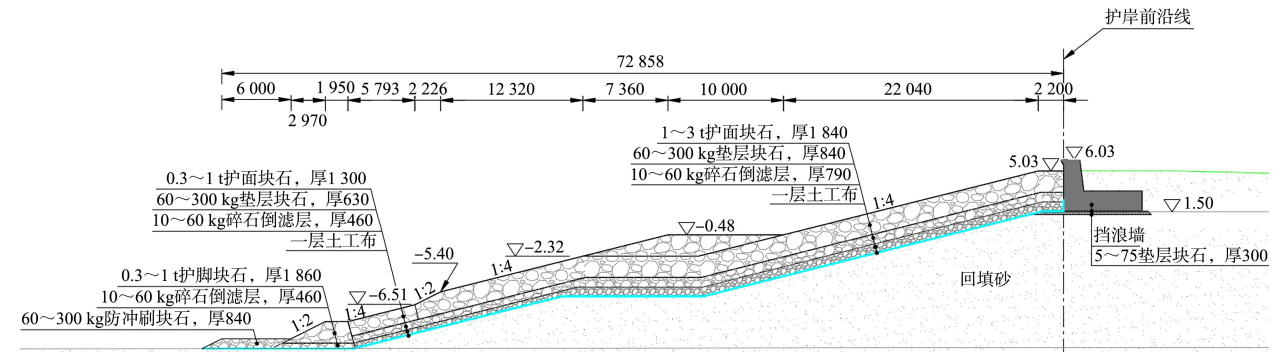


图 1 海侧护岸典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

海侧护岸挡墙采用素混凝土浇筑，挡墙需要承受正向波浪的作用，挡墙高 4.47 m，底宽 6.8 m，底座高 1.75 m，挡墙前护面块石平台宽度为 2.2 m，挡墙顶部设有牛鼻以减少越浪量；工程设计水位

为 2.72 m，原泥面高程取 -10 m，挡墙顶高程为 6.03 m，设计波高为由标准 JONSWAP 波浪谱计算得到的有效波高 $H_{m0}=5.41\text{ m}$ ，谱峰周期 $T_{m-1,0}=8.0\text{ s}$ ，其余尺寸和高程如图 2 所示。

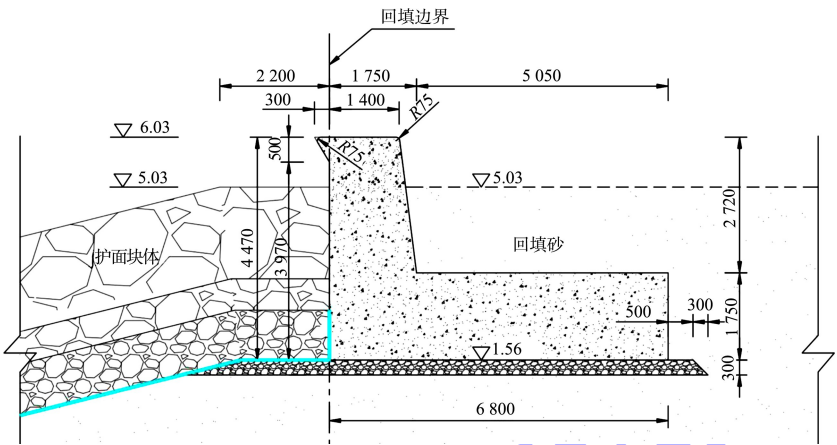


图 2 挡墙尺寸 (尺寸: mm; 高程: m)

2.2 二维模型试验

二维模型试验在波浪水槽中进行，水槽长、宽、高分别为 40、1.2、1.7 m，水槽布置如图 3 所示。造波机可以根据需要产生各类不同频谱的波浪，主动消波装置可以减小水槽中波浪反射的

影响，为了还原近岸波浪的传播过程，对试验区的水槽底面进行适当抬高，在试验区还设置了透明玻璃制作的观察窗口，方便观察波浪爬坡和越浪情况，以及护岸损坏情况。

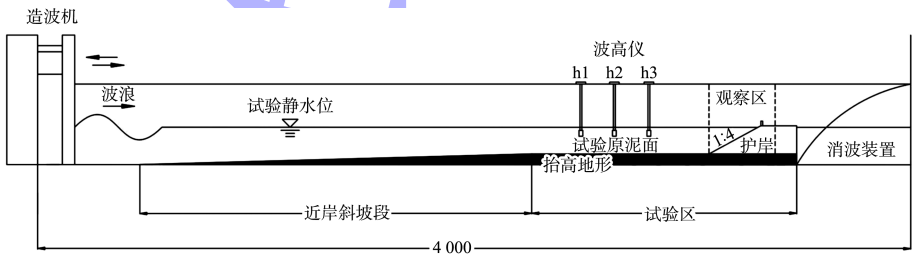
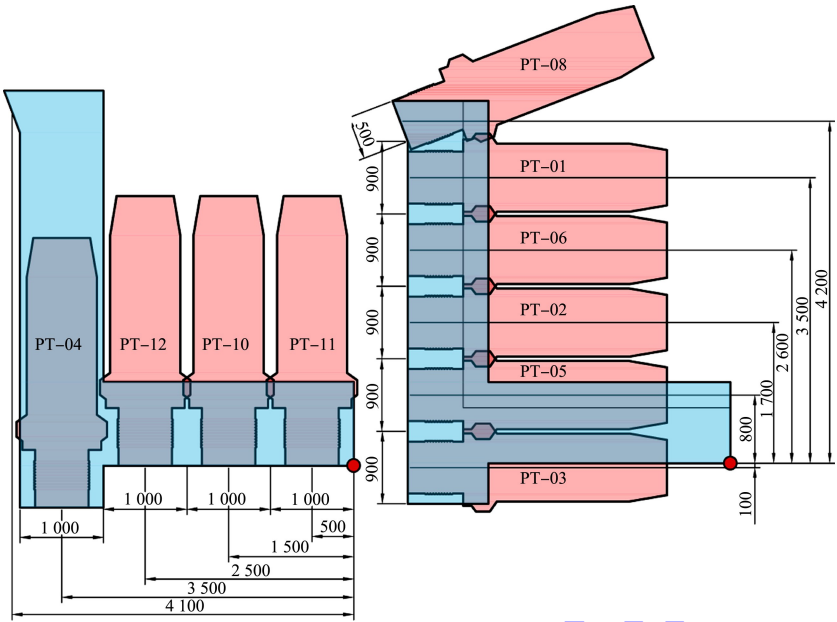


图 3 波浪水槽布置 (单位: mm)

为了尽可能避免试验中波浪和结构物相互作用时的比尺效应，试验遵循弗劳德数相似原则，模型比尺取 1:35。护岸模型按如图 1 所示的典型断面进行布置，所有石料的密度为 2.65 t/m³，模型中碎石倒滤层所用石料尺寸保证水流通过时能够形成完全的湍流，其余块石护面所用石料除了在尺寸上按照比尺进行选择外，还应保证块石的稳定特性与原型相似。设置在护岸顶部的挡浪墙原型高 4.97 m、宽 6.8 m，在模型试验中，木制

挡浪墙模型按照试验比尺缩小，并参照原型设置了防浪的牛鼻。试验过程中，作用在挡墙正面和底板的波浪力通过 10 个波压计测量，波压计的布置如图 4 所示，波压计的采样频率设为 676 Hz，以确保任何作用在挡墙上的波浪力都能被清晰记录。波浪力取波浪稳定后前 1 000 个波中的最大水平力(力矩)和浮托力(力矩)，即波浪力的累计概率为 0.1%。需要注意的是，本试验中作用在挡墙底部的浮托力包括了静水压力和波浪力。



注: PT 为波压计编号。

图 4 波压计布置 (单位: mm)

试验中采用标准 JONSWAP 波浪谱进行造波, 分别模拟了 1、25 和 1 000 a 一遇的波浪工况, 水位均取对应重现期的极端高水位, 本文仅针对 1 000 a 一遇的工况进行研究, 设计谱峰波高 $H_{m0}=5.41\text{ m}$, 波浪谱周期 $T_{m-1,0}=8.0\text{ s}$ 。试验中产生的越浪量可以通过试验区的观察窗口进行观察, 并在护岸模型后方进行收集, 每组试验待波浪稳定后, 在护岸挡浪墙后方对 $1\,000T_{m-1,0}$ 时间内的越浪量进行收集, 并计算其平均越浪量。

2.3 波浪力计算假定

由于各计算公式均有不同的限制条件, 而在实际工程中很难同时满足所有条件, 因此本工程在计算中对输入参数做了合理的简化和假定: 1)波浪力在计算过程中暂不考虑斜向浪的影响; 2)在使用 Jensen & Bradbury 公式时, 选择断面 D 进行计算; 3)工程中护岸实际坡度为 1:4, 大于 Pedersen 公式中的 1:3.5, 因此在使用该公式进行计算时, 护岸坡度取 1:3.5; 4)在使用 Molines 公式计算时, 需要保证挡墙底高程高于静水面, 在本工程应用中假定挡墙底高程为 2.80 m, 略高于静水面 2.72 m, 挡墙面高度保持不变; 5)为了同试验中波浪力进行比较, 计算中挡墙高度取 4.97m, 与试验模型高度相同。

2.4 结果分析

各公式计算结果和试验数据对比见图 5。

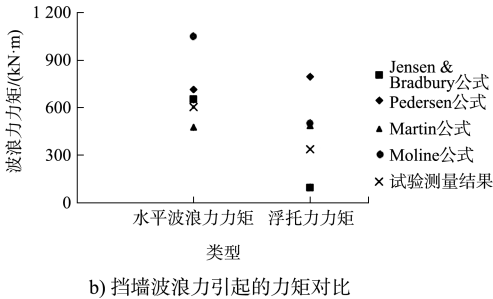
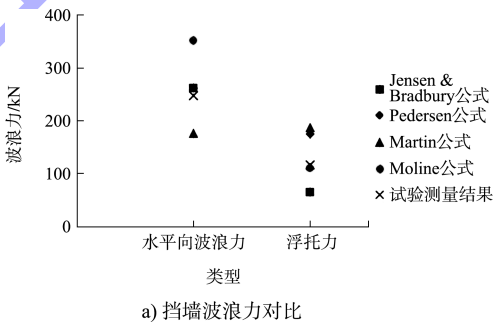


图 5 各公式计算结果和试验数据对比

由图 5 可知, Jensen & Bradbury 公式和 Pedersen 公式计算所得水平力和力矩大小相当, 且均与试验值相近, 而 Martin 公式计算所得水平波浪力和力矩比实测值小, Moline 公式计算值远大于实测值。由于推导 Jensen & Bradbury 公式所用试验数据较少且自变量挡墙高度对结果影响有限, 因此

该公式仅适用于中等越浪量的情况，当挡墙上越浪量较大时，该公式适用性欠佳^[6]。Pedersen 公式是在 Jensen 等的研究基础上通过考虑波浪爬高的影响总结出来的公式。就本工程而言，设计波浪条件下的越浪量较小，因此这两个公式的计算结果相近且比较符合实际。Martin 公式则考虑了护岸块体导致的波浪破碎的影响，因此波浪能量在到达挡墙前就有一部分损耗，导致作用在挡墙上的波浪力减小。Moline 公式是通过越浪量计算波浪力，由于采用其推荐公式计算所得越浪量和模型中实测越浪量相差较大，因此导致结果有较大差异，建议在使用该公式时，越浪量采用实测数值。

从浮托力和力矩的计算结果来看，Jensen & Bradbury 公式的计算值最小，小于实测值，其余 3 个公式计算结果与实测值有一定差异，但都大于实测值且在同一个量级上，其中 Moline 公式最为接近，Martin 和 Pedersen 公式计算结果稍大于实测值。挡墙底部浮托力和力矩的计算，现有国内外公式均未考虑浮托力受墙底相对与计算水位高度和堤心渗透性等因素的影响，因此计算值和实测值存在较大差异。

3 结 论

1)在水平向波浪力的计算上，当设计波浪越浪量较小时，Jensen & Bradbury 和 Pedersen 公式可以得到较为贴近实际的波浪力，当越浪量较大时，可以考虑采用 Moline 公式获得较为保守的设计波浪力。

2)在浮托力计算上，Martin 公式在计算脉动压强时，浮托力在挡墙底部呈梯形分布，且考虑了堤心渗透系数等影响。其他公式则考虑浮托力在墙底呈三角形分布，由墙前将至墙后零点，而未考虑浮托力受墙底相对于计算水位的高度和堤心渗透性的因素影响，与实际工程不符。

3)将经验公式计算结果与试验测量波浪力进行对比，发现 Pedersen 公式的计算结果与实测结果最为接近且偏于保守。

参考文献：

[1] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering: CIRIA C683[S].2nd ed. London: CIRIA, 2007.

[2] US Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual: EM 1110-2-1100[S].Washington: USACE, 2002.

[3] BRADBURYAP, ALLSOPNWH, STEPHENSRV. Hydraulic performance of breakwater crown walls[R]. London: HR Wallingford, 1988.

[4] MOLINES J, HERRERA M P, MEDINA J R. Estimations of wave forces on crown walls based on wave overtopping rates[J]. Coastal engineering, 2018, 132: 50-62.

[5] HAMILTON D G, HALL K R. Preliminary analysis of the stability of rubble mound breakwater crown walls[C]//The American Society of Civil Engineers. The Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering.New York: ASCE, 2012: 1217-1230.

[6] PEDERSEN J. Wave forces and overtopping on crown walls of rubble mound breakwaters: an experimental study[M]. Aalborg: Aalborg University Press, 1996.

(本文编辑 王璁)

(上接第 48 页)

[7] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅷ):混凝土与钢筋混凝土结构[J].港工技术与管理,2000(5):32-39,48.

[8] 朱海涛.俄罗斯建筑规范介绍(Ⅸ):混凝土与钢筋混凝土结构[J].港工技术与管理,2000(6):38-43.

[9] 郭松.俄罗斯规范计算混凝土构架[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(9):86-87.

[10] 吴雪峰.中俄同抚大堤大桥预应力混凝土连续梁设计研究[J].铁道建筑,2018,58(2):9-12.

[11] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构

设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2011.

[12] СП 63.13330.2018: Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003(с Изменением N 1)[S]. Москва: Стандартинформ, 2020.

[13] (苏)曼德利科夫.钢筋混凝土结构计算实例[M].孙克俭,译.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1987:57-62.

[14] 滕智明.钢筋混凝土基本构件[M].2版.北京:清华大学出版社,1987:358-362. (本文编辑 武亚庆)