



斜坡堤后坡砌石护面稳定厚度的模型试验研究*

陈伟秋¹, 陈凌彦¹, 王登婷², 孙天霆², 朱嘉玲¹

(1. 河海大学, 江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘要: 防波堤工程中堤顶越浪量的增加易导致堤后破坏, 造成重大生命财产损失。针对这一问题, 对防波堤后坡干砌块石护面进行系列物理模型试验, 根据越浪对堤后不同砌块厚度的冲刷破坏情况, 讨论堤后砌块护面稳定厚度与越浪量之间的关系。在此基础上, 对平均越浪量进行分析, 并对比国内外现有越浪量计算公式, 结合我国常用防波堤结构形式, 提出不规则波作用下的平均越浪量计算公式。最终给出不规则波作用下后坡干砌块石稳定厚度的计算公式。结果表明, 公式与试验结果吻合度较好, 可为我国防波堤后坡护面结构设计提供重要参考依据。

关键词: 平均越浪量; 干砌块石; 堤后护坡; 稳定厚度

中图分类号: TV 139.2⁵; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0093-06

Experimental study on thickness of inner block revetment of sloped seawall

CHEN Wei-qiu¹, CHEN Ling-yan¹, WANG Deng-ting², SUN Tian-ting², ZHU Jia-ling¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Dike failure is caused by overtopping breakwater, which results in a serious loss of lives and property. To solve this problem, a series of physical model tests were conducted on stable thickness of block revetment on the inner slope of the seawall. According to the erosion of block embankment with different thicknesses, we probe into the relationship between the armor thickness and average overtopping. Equations are given for the stable thickness of facing block on the inner slope. New equations are also presented for average overtopping discharge based on the analysis of mean wave overtopping and comparison of the domestic and foreign existing overtopping formulae. It can provide reference for the design of seawalls.

Keywords: average overtopping discharge; block revetment; inner embankment protection; stable thickness

防波堤和海堤是保护人类和基础工程设施免受洪水和风暴潮袭击的重要海岸工程, 海堤的破坏将造成重大的生命财产损失。对于水深大、波高大且周期长的海堤工程, 尤其是建在低滩上的海堤, 波浪爬高大, 若按不允许越浪设计, 则堤顶高程较高、投资成本增加, 因此应按允许海堤越浪进行设计计算。然而, 在风暴潮作用下堤顶

越浪量增加, 对护坡块石稳定性造成重大影响, 进而影响海堤工程的整体稳定性, 因此后坡防护问题一直受到各国重视。国内外学者对后坡越浪流进行了较为深入的研究, 但对于后坡干砌块石护面稳定厚度, 国内外尚无相关公式, 我国 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》^[1]仅对前坡干砌块石护面厚度有相关规定, 因此对后坡

收稿日期: 2015-12-28

***基金项目:** 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(20141004); 国家自然科学基金(51579156); 南京水利科学研究院院基金重大项目(Y214009); 江苏省水利科技项目(2012001-8); 江苏省水利科技项目(2014048)

作者简介: 陈伟秋(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口水工结构。

砌石护面稳定厚度进行定量分析对防波堤设计与堤后防护有较大意义。基于以上原因，应针对我国海堤形式，对越浪流作用下海堤后坡的破坏问题进行深入系统的研究。

由于干砌块石广泛应用于防波堤后坡防护工程中，因此本文物理模型试验中堤后护面形式选用干砌块石。在试验基础上，探讨砌块稳定厚度与平均越浪量之间的关系，并提出不规则波作用下的砌块稳定厚度计算公式。对试验测得的越浪量进行计算分析，并对比国内外现有越浪量计算公式，提出改进的 Hebsgaard 平均越浪量计算公式。

1 国内外研究现状

1.1 平均越浪量研究现状

国内外学者对平均越浪量均进行过相关研究。美国的 Saville^[2] 基于模型试验研究成果，提出了平均越浪量计算公式；日本 Yuichi Iwagaki 等^[3] 基于 Saville 的试验资料，得到水深和波高对越浪量的影响曲线；英国的 Owen^[4] 提出了单坡和复坡斜坡堤上越浪量计算公式；荷兰的 Van der Meer^[5] 对越浪量进了系统的研究，提出的越浪量公式被许多欧洲国家采用；王红等^[6] 提出了不规则波作用下单坡堤上平均越浪量公式；俞聿修等^[7] 针对斜向波对直立堤进行了物理模型试验，提出了考虑波向角等因素的平均越浪量公式。以下为几个常用的越浪量计算公式。

1) Owen 公式。

$$\frac{q}{T_m g H_s} = A \exp \left[- \frac{B R_c}{T_m (g H_s)^{0.5}} \right] \quad (1)$$

式中： T_m 为海堤堤脚处入射波浪的平均周期； A 、 B 为经验系数，对单坡和带肩台的斜坡堤取值不同。公式的适用范围为 $0.05 < \frac{R}{T_m (gH)} < 0.30$ 。

2) Hebsgaard 公式^[8]。

$$\frac{q}{\sqrt{g H_s^3}} = k_1 \ln(S_{op}) \exp \left[\frac{k_2 (\cot \alpha)^{0.3} (2R_c + 0.35b)}{\gamma_f H_s \sqrt{\cos \beta}} \right] \quad (2)$$

式中： q 为平均越浪量； H_s 为有效波高； R_c 为堤顶高程； S_{op} 为按线性波浪理论求得的深水波陡， $S_{op} = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2}$ ， T_p 为谱峰周期； γ_f 为护面层糙率影响系数； β 为波向角，当波浪垂直堤坝轴线入射时，取 90° ；有胸墙时， k_1 取 -0.01 ， k_2 取 -1.0 。

3) Van der Meer 公式。

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_0 \exp \left(-4.3 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right) \quad (3)$$

平均越浪量的最大值按下式控制：

$$\left(\frac{q}{\sqrt{g H_{m0}^3}} \right)_{\max} = 0.2 \exp \left(-2.3 \cdot \frac{R_c}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right) \quad (4)$$

式中： α 为前坡与水平面的夹角； γ_b 为设置平台时的折减系数； ξ_0 为波浪破碎系数， $\xi_0 = \tan \alpha / \sqrt{H_s / L_0}$ ， $L_0 = (g / 2\pi) T_{m-1,0}^2$ ； γ_β 为波浪斜向入射系数； γ_v 为防浪墙影响系数。

4) 《海港水文规范》^[9] 公式。

$$q = 0.07 H_c / H_s \exp \left(0.5 - \frac{b_1}{2 H_s} \right) B k_A \frac{H_s^2}{T_p} \cdot \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th} \left(\frac{d}{H_s} - 2.8 \right) \right]^2 \ln \sqrt{\frac{g T_p^2 m}{2\pi H_s}} \quad (5)$$

式中： q 为单位时间单位防浪墙顶宽度的越浪量； k_A 为护面结构影响系数，与护面结构形式有关； T_p 为谱峰周期； A 、 B 为与 m 有关的经验系数。

1.2 后坡防护问题研究现状

国内外对后坡防护均有研究。许多学者对后坡破坏进程及越浪水体在后坡上的流速、水体厚度等参数进行了深入研究，以此确定对后坡的保护。Moeller J^[10] 通过模型试验，分析了越浪流对后坡的破坏进程；Holger Schüttrumpf^[11] 从试验和理论两方面对越浪水体的参数进行研究；Van Gent^[12] 从物理试验模型和数学模型两方面进行分析，提出了单个越浪时越浪流在海堤上的水体厚度及流速计算公式；Hughes S A 等^[13] 综合考虑波浪和风暴潮，通过二维模型试验，给出瞬时越浪量分布以及越浪流流速及压强公式等；范红霞^[14] 对越浪流的破坏范围和位置进行了定性分析。

1.2.1 Van Gent 研究成果

越浪水体在堤顶上的水体厚度、流速公式:

$$\frac{h_{2\%}}{H_s} = C'_h \left(\frac{R_{u2\%} - R_c}{\gamma_f H_s} \right) \quad (6)$$

$$\frac{u_{2\%}}{\sqrt{gH_s}} = C'_u (\gamma_{f-c})^{0.5} \left(\frac{R_{u2\%} - R_c}{\gamma_f H_s} \right)^{0.5} / \left(1 + C''_u \frac{B}{H_s} \right) \quad (7)$$

式中: γ_{f-c} 为堤顶糙率系数; C'_h 、 C'_u 、 C''_u 为经验系数, 分别取 0.1、1.7、0.1。

越浪水体在后坡上的水体厚度、流速公式:

$$h = h_0 u_0 / \left[\frac{A}{B} + \mu \exp(-3AB^2 s) \right] \quad (8)$$

$$u = \frac{A}{B} + \mu \exp(-3AB^2 s) \quad (9)$$

式中: s 为沿后坡的横坐标, 在堤顶与后坡连接处为 0; h_0 、 u_0 为堤顶与后坡连接处的水体厚度及流速, 可由式(6)和式(7)计算得到。

1.2.2 Hughes S A 研究成果

越浪水体在后坡的平均厚度及流速公式如下:

$$h = 0.4 \left(\frac{1}{g \sin \theta} \right)^{1/3} (q_{ws})^{2/3} \quad (10)$$

$$u = 2.5 (q_{ws} g \sin \theta)^{1/3} \quad (11)$$

q_{ws} 可由下式计算:

$$\frac{q_{ws}}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.034 + 0.53 \left(\frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{1.58} \quad (12)$$

式中: q_{ws} 为在波浪和风暴潮作用下的平均越浪量; θ 为后坡与水平面的夹角。

综上, 现有研究成果主要通过对后坡越浪流参数的研究来确定后坡防护标准, 而在后坡干砌块石护面厚度方面没有相关计算公式。

2 模型设计及试验方法

2.1 试验设备

本次模型试验在南京水利科学研究院泥沙基本理论试验厅中进行, 波浪水槽长 175 m、宽 1.2 m、高 1.5 m, 最大波高约为 0.35 m, 波周期范围为 0.5~6.0 s, 推波板采用平推式, 最大速度不小于 0.75 m/s。由计算机自动控制产生所要求的波浪要素, 同时对波高仪测得的水面波动信号进行数据采集和处理。该造波设备可根据试验要求产生不

同谱型的不规则波。

本次试验越浪量采用接水箱接取测量, 接水箱宽度为 0.2 m, 一次波浪采集数据控制在 140~200 个波。

2.2 试验方法

本次模型试验断面采用简单的单坡斜坡堤, 前坡坡度为 1:1.5, 防浪墙采用直立式, 堤前护坡采用扭王字块, 后坡护面采用干砌块石, 堤前水深 $d=40$ cm, 防波堤模型断面见图 1。

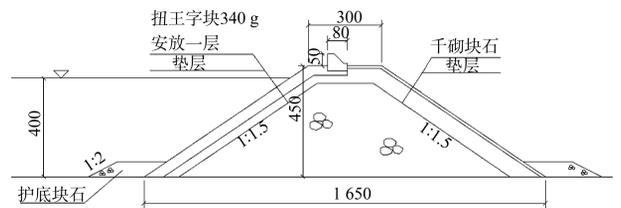


图 1 试验断面 (单位: mm)

将不同砌块厚度、不同波周期组合进行系列模型试验, 对每一种组合, 先以较小的波高作用于试验断面, 当波浪爬高大于墙顶高程时产生越浪, 越浪砸击堤后干砌块石护面, 若砌块稳定, 则继续增大波高, 直至砌块护面发生失稳破坏, 并测出其对应的平均越浪量。观察干砌块石的破坏进程, 每组试验后需对砌块护面进行重新整平。试验组合包括: 1) 波周期分别为 1、1.7、2、3 s; 2) 砌块厚度分别选用 1.2、1.5、2.5、3.5 cm; 3) 波浪为不规则波, 采用 JONSWAP 谱进行模拟。每组试验至少重复 3 次, 以避免偶然因素的影响, 保证试验结果的有效性。

2.3 护面块体稳定性判别标准

JTS 145-2—2013 《海港水文规范》^[9] 规定: “波浪作用下斜坡式建筑物护面块体的稳定标准, 以容许失稳率 n 表示, 即静水面上下各一个设计波高范围内, 容许被波浪打击移动或滚落的块体个数所占的百分比。”对于干砌块石护面, 如果一个块体在波浪作用下滚落, 则护面以下的垫层将受到波浪的淘刷侵蚀作用, 在波浪长时间持续作用下, 护坡将进一步发生破坏, 进而影响防波堤的整体稳定性。因此本文认为砌块护面一个块体发生滚落即视为失稳。文献[15]指出将干砌块石

在某一波浪要素作用下产生位移临近滚落而没有发生滚落的状态称为临界稳定。

3 试验结果及分析

3.1 后坡破坏进程分析

为确定后坡砌石护面稳定厚度与波高、波周期的关系，对每一种护面厚度进行不同波高和波周期的组合，观察后坡砌石护面的破坏进程。

当波浪爬高大于防浪墙顶高程时，墙顶处发生越浪。干砌块石在越浪作用下，少数块石轻微摆动，当波高达到临界波高时，个别砌块向上翘起，从垂直试验断面水平方向可观察到后坡砌块护面发生轻微变形，但由于周围干砌块石的摩擦作用，突起的块石并未立刻发生滚落。在波浪持续作用下，多个块石显著突起，个别砌块位移逐渐增大直至发生脱落，越浪对护面损坏处继续淘刷，多个块石滚落，最终导致后坡护面块石大面积失稳。另外，观察后坡护面的破坏进程发现，首先发生失稳破坏的主要部位是防浪墙后堤顶处，以及堤顶与后坡连接处。这是因为波浪越过越浪墙后在自重作用下砸击墙后堤顶，造成防浪墙后的块体突起，从而发生失稳破坏；而堤顶和后坡的连接处对水平切力的抵抗能力弱，因此此处砌块容易被掀起。

3.2 后坡砌块稳定厚度确定

在试验过程中发现，波周期一定时，随着波高的增大，砌块护面发生破坏时的厚度随之增大，因此首先分析相对厚度随波陡的变化，将二者关系绘于图2。

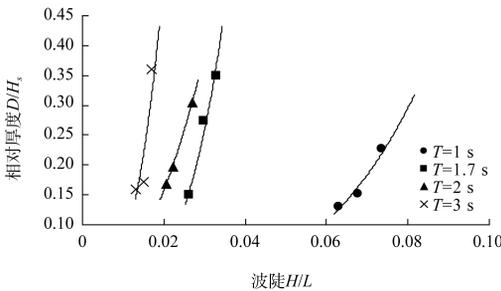


图2 相对厚度与波陡关系

对图2进行分析，可得如下结论：

1) 在不同周期下，相对厚度均随波陡的增加

而增加。由上文可知越浪量随波陡增大而增大，越浪量越大，必然对堤后护坡的作用力越大，则所需稳定厚度也越大。

2) 在周期 $T=1.7、2、3$ s 时，相对厚度随波陡增大的增幅很大，在 $T=1$ s 时，波陡增幅较大，相对厚度随波陡增大的增幅较小。可见当周期较大时，砌块相对厚度对波高变化十分敏感。

3) 对同一砌块相对厚度，周期越小则干砌块石发生临界失稳所对应的波陡越大。

以上结论仅给出了砌块相对厚度与波陡之间的定性关系，难以应用到实际工程中。在波周期一定的情况下，随着波陡的增高，即波高的增大，平均越浪量逐渐增大，因此为确定后坡砌块护面厚度公式，将厚度无因次化，进一步探究其与无因次越浪量之间的关系（图3）。

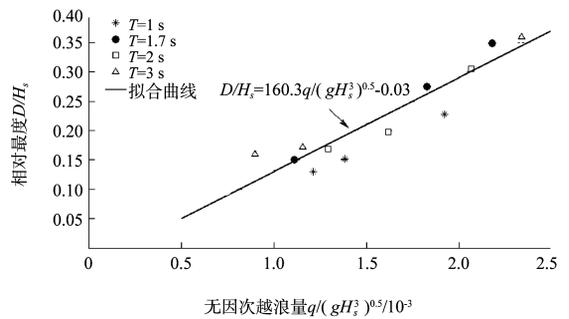


图3 相对厚度与无因次越浪量关系

由图3可知，相对厚度与无因次越浪量成线性关系，相对厚度随越浪量的增大而增大，其公式为：

$$\frac{D}{H_s} = \frac{160.3q}{\sqrt{gH_s^3}} - 0.03 \quad (13)$$

式中： D 为后坡砌块护面稳定厚度； H_s 为有效波高； q 为平均越浪量。相关系数 $r=0.93$ ，可见公式与试验结果吻合较好。

公式(13)给出了相对厚度与平均越浪量之间的关系，然而在实际工程设计中平均越浪量不易直接获取，因此需提出平均越浪量的计算公式，以便于后坡砌块护面厚度公式在防波堤工程中的直接应用。

将测得的越浪量无因次化，并与 Hebsgaard 公式、Van Der Meer 公式和《海港水文规范》公式进

行对比, 对比结果见图 4。

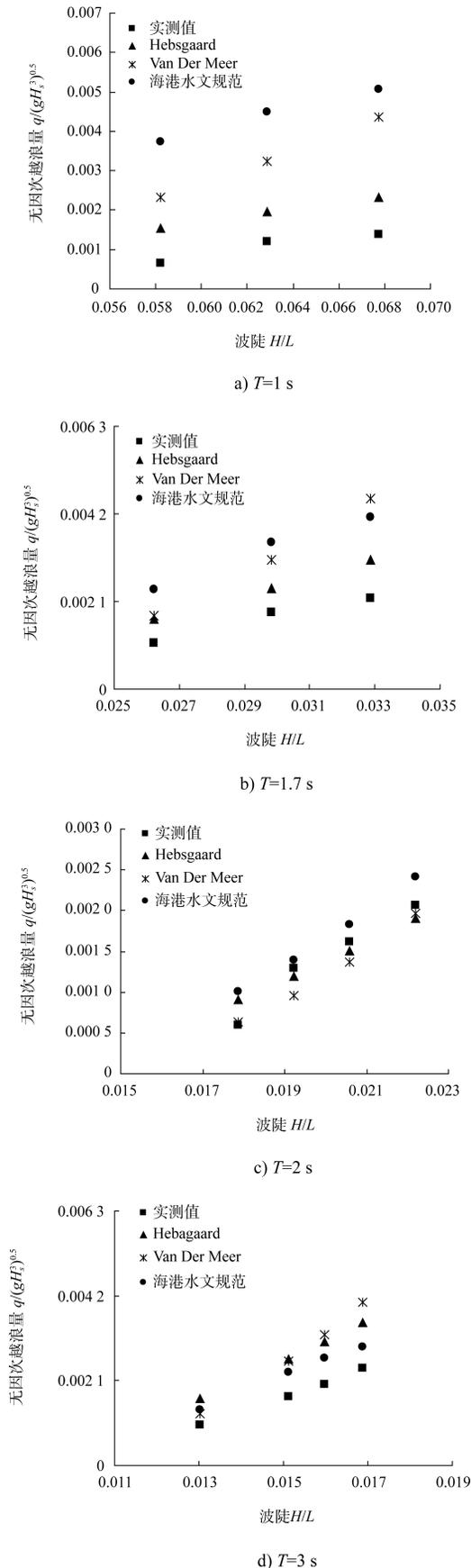


图 4 平均越浪量对比

对图 4 进行分析, 可得如下结论:

1) 在周期相同的情况下斜坡堤平均越浪量随波陡增大而增大, 实测值亦呈现此趋势, 证明试验结果是合理有效的。

2) 当 $T=1、1.7、2\text{ s}$ 时, Hebsgaard 公式与试验值最接近, 当 $T=3\text{ s}$ 时, 《海港水文规范》结果与试验结果最接近, 但当 $T=1、1.7、2\text{ s}$ 时, 《海港水文规范》结果与实测值相差较大, 且计算值偏大。

3) 当 $T=1\text{ s}$ 时, 各公式结果差别较大, 随着周期增大, 各公式计算结果趋于接近。《海港水文规范》结果始终比实测值偏大, 可见在计算越浪量时, 《海港水文规范》公式比较保守、设计偏安全。

4) 综合对比试验结果与以上各公式计算结果发现, Hebsgaard 公式较其他两个公式更加接近实测值, 提出改进的 Hebsgaard 公式如下:

$$q = k_1 \sqrt{gH_s^3} \ln(S_{op}) \exp \left[\frac{k_2 (\cot \alpha)^{0.3} (2R_c + 0.35b)}{\gamma_f H_s \sqrt{\cos \beta}} \right] \quad (14)$$

有胸墙时, $k_1 = -0.0067$, $k_2 = -1.0$, 其余系数与式(2)相同。

将式(14)的计算值与实测值进行对比, 结果见图 5。由图 5 可知, 平均越浪量公式计算值与实测值的相关系数为 0.95, 改进的 Hebsgaard 公式的计算值与实测值吻合较好, 计算值总体比实测值偏大, 公式偏安全。

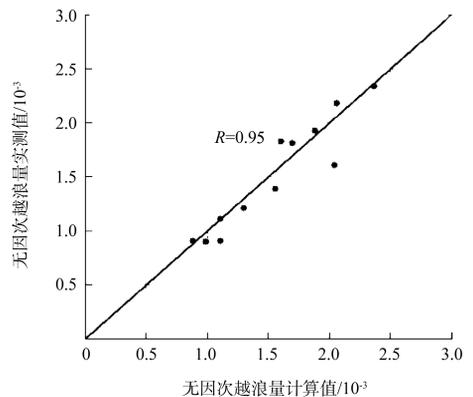


图 5 改进的 Hebsgaard 公式与实测值对比

综上所述, 采用式(13)可对后坡砌块护面稳定厚度进行计算, 式中的平均越浪量计算采用式(14)。

对公式计算所得的砌块厚度与试验值进行对比验证, 结果见图 6。由图 6 可以看出, 本文提出

的干砌块石厚度公式的计算值与实测值相关系数为0.91, 计算值与试验值吻合较好。本文提出的公式可为防波堤后坡防护提供参考。

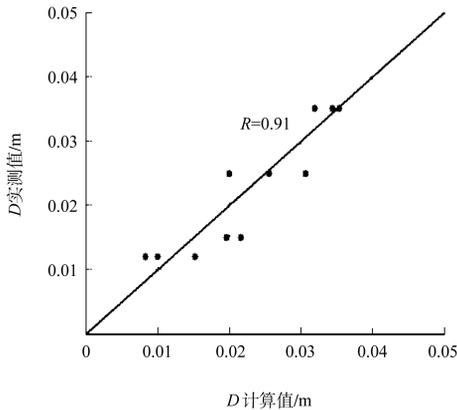


图6 砌块厚度公式计算值与实测值对比

4 结论

1) 本文对后坡干砌块石护面进行了不规则波作用下的系列物理模型试验。在波浪作用下, 砌块失稳的主要原因是越浪水体冲蚀堤顶及后坡, 致使防波堤失稳。后坡首先发生失稳位置主要是防浪墙后堤顶及堤顶与后坡连接处, 在进行堤后防护时, 需着重考虑这两个部位, 并进行适当加固。

2) 通过越浪量试验, 对比分析国内外现有的越浪量公式, 提出了不规则波作用下改进的Hebsgaard公式, 结果表明, 越浪量随波陡的增大而增大, 公式计算结果与试验结果吻合度较好。

3) 通过对砌块稳定性的系列试验, 提出了不规则波作用下后坡砌块厚度的计算公式, 试验结果表明, 波高是决定砌块厚度最直接的因素, 相对厚度与无因次越浪量成线性关系, 相对厚度对波高变化敏感, 在周期一定的情况下, 随波陡的增大而增大。经验证, 本文提出的后坡砌块护面稳定厚度的计算公式是合理有效的。

4) 本文提出的后坡砌块稳定厚度公式仅针对某一断面, 对于与本文断面形式不同的情况, 需通过物理模型试验进行考虑。

5) 本文提出的后坡护面稳定厚度公式仅考虑了干砌块石护坡, 而实际工程中有多种后坡护面形式, 应对抛石、混凝土板等护坡形式进行相应的模型试验研究, 使公式更具适用性和普遍性。

参考文献:

- [1] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [2] Saville T. Large-scale model tests of wave run-up and overtopping on shore structures[M]. Washington, D C: US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1958.
- [3] Iwagaki Y, Shima A, Inoue M. Effects of wave height and sea water level on wave overtopping and wave run-up[J]. Coastal Engineering in Japan, 1965(8): 141-151.
- [4] Owen M W. Design of seawalls allowing for wave overtopping[M]. Wallingford: HR, 1980.
- [5] Meer J W V D, Janssen J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes[J]. American Society of Civil Engineers, 1995(2): 175-189.
- [6] 王红, 周家宝, 章家昌. 单坡堤上不规则波越浪量的估算[J]. 水利水运工程学报, 1996(1): 58-63.
- [7] 李晓亮, 俞聿修, 赵凤亚, 等. 斜向和多向不规则波在斜坡堤上的平均越浪量的试验研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(1): 139-149.
- [8] Hebsgaard M, Sloth P, Juhl J. Wave overtopping of rubble mound breakwaters [J]. Coastal Engineering, 2012, 2: 2 235-2 248.
- [9] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [10] Moller J, Weissmann R, Schüttrumpf H, et al. Interaction of wave overtopping and clay properties for seadikes[C]//ASCE. Proceedings of the 28th International Conference. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003: 2 105-2 115.
- [11] Schüttrumpf H, Oumeraci H. Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at seadikes[J]. Coastal Engineering, 2005, 52(6): 473-495.
- [12] Van Gent M R A. Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores: 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra[R]. Netherlands: Deltares, 1999.
- [13] Hughes S A, Nadal N C. Laboratory study of combined wave overtopping and storm surge overflow of a levee[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(3): 244-259.
- [14] 范红霞. 斜坡式海堤越浪量及越浪流试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [15] 潘军宁, 王登婷, 吴美安, 等. 波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 476-481.